Habilitation à Diriger des Recherches

Sylvain OUILLON

Transport de Matières En Suspension en zones côtières :

Etude intégrée par mesures, télédétection et modélisation

Mars 2004

TABLE DES MATIERES

Première Partie

RESUME DE CARRIERE

---

1. Curriculum Vitae succinct

Sylvain OUILLON
né le 15 avril 1966
marié, 3 enfants
http://www.ird.nc/CAMELIA/Sylvain_Ouillon.html

Adresse : IRD - BP A5 - 98848 Nouméa cedex - Nouvelle-Calédonie
Tél : (+687) 26 07 29 Fax : (+687) 26 43 26
sylvain.ouillon@noumea.ird.nc

Etudes, Diplômes, Distinction

1984-86	Classes préparatoires, lycée Charlemagne, Paris
1989	Ingénieur ENSEEIHT (Ecole Nationale Supérieure d'Electronique, d'Electrotechnique, d'Informatique et d'Hydraulique de Toulouse) Filière Hydraulique-Mécanique des fluides, Option Sciences de l'eau
1989	DEA en Physique et Chimie de l'Environnement, Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT), mention "Assez Bien"
1993	Doctorat de l'INPT, mention "Très honorable avec félicitations" Sujet de thèse : *Modélisation mathématique de l'hydrodynamique à surface libre et du transport en suspension de sédiments non cohésifs. Aide à l'interprétation d'images spatiales*. Jury : MM. L. Masbernat (président), J.F. Minster, A. Temperville (rapporteurs), B. Caussade (directeur de thèse), D. Dartus, G. Flouzat, A. Liné, J.P. Rebert
1994	Prix de thèse Léopold Escande 1994 (INP Toulouse)

Emplois

1993-...	Maître de Conférences à l'Université du Sud Toulon-Var (UTV) poste en section 37 du CNU (Météorologie, Océanographie, Physique de l'Environnement) *Titularisation le 1er sept. 1994 - Passage en 1ère classe le 1er août 1995* Détaché à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) sur un poste de Chargé de Recherche du 1er Sept. 2001 au 31 Août 2005. Affecté à Nouméa, Nouvelle-Calédonie.
1993	Qualification aux fonctions de Maître de Conférences en section 60 du CNU
1992-93	Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER) à l'ENSEEIHT
1989-92	Moniteur de l'Enseignement Supérieur, à l'ENSEEIHT
1989-92	Boursier de recherche CNRS (BDI) à l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT).

2. Contexte des activités de recherche

2.1 Programmes et Financements

Projets en cours

- Programme National d'Environnement Côtier (**PNEC**) : Chantier Nouvelle-Calédonie, depuis *2000* (Dir. : R. Fichez, C. Grenz).
- **NASA**, programme IDS. Projet "Environmental Assessments of Coral Reef Ecosystems: Interdisciplinary Research Using EOS Platforms and Numerical Models" (Dir.: S. Andréfouët), *2004-2007*. Co-Investigateurs: F. Müller-Karger, C. Hu (Univ. S. Florida); J. Sheng, B. Hatcher (Dalhousie Univ., Canada); C. Steinberg (AIMS, Australie); W. Skirving, A. Strong (NOAA/NESDIS, MD); S. Ouillon, P. Douillet (IRD Nouméa). Budget global : 1.1 M$.
- **ACI** "Observation de la Terre" (Action Concertée Incitative du Ministère de la Recherche). **Coordinateur** des Programmes ID-ROM en *2001-2002* et BISSECOTE en *2004-2005*. 10 laboratoires participants dont l'UR CAMELIA, le LODYC et l'US Espace de l'IRD, l'University of South Florida, le Laboratoire Arago de Banyuls, le Département de Géologie et d'Océanographie (DGO) de l'Université Bordeaux I, le Centre Océanologique de Marseille (COM) et l'Université de Polynésie Française. Budget obtenu en 2001 : 100 kf. Budget obtenu fin 2002 : 68 k€ (crédits versés en 2004).
- **ZoNéCo**, Programme d'analyse et de valorisation des ressources de Nouvelle-Calédonie financé par les Ministères de la Recherche et de l'Outre-Mer ainsi que par le gouvernement et les Provinces de Nouvelle-Calédonie. Action de recherche depuis *2003* (dont financement de thèse).
- **Ministère de l'Outre-Mer (MOM)**. Projet "Modélisation 3D de la circulation lagonaire en milieux d'atolls des Tuamotu" (Dir.: S. Andréfouët), *2004 : étude préliminaire, 2005-2008 : projet complet*. Participants: E. Deleersnijder (Univ. Catholique de Louvain, Belgique); K. Maamaatuaiahutapu (Equipe Terre-Ocean, Univ. Polynésie Francaise, Tahiti); G. Remoissenet (Service des Pêches, Tahiti); D. Buestel (IFREMER, Tahiti); G. Cabioch (UR 055 Paléotropique, IRD Nouméa); J. Iltis (US Espace, IRD Tahiti); P. Douillet, S. Ouillon (IRD Nouméa). Budget : 13 k€ pour 2004.

Projets terminés

- Programme National d'Environnement Côtier (**PNEC**) : volet 'Télédétection' et action de recherche SARHYGOL 'Suivi Automatique et Régulier de l'HYdrologie du GOlfe du Lion' du Chantier Golfe du Lion, *1998-2001.*
- Programme ATmosphère et Océan à Multi-échelles (**PATOM**), Action de recherche SARHYM (Suivi Automatique et Régulier de l'Hydrologie du Golfe du Lion et Modélisation), *2000-2001.*
- **Environment,** Climatology and Natural Hazard (**E.U.**) : Programme MEDiterranean DELTas (***MEDDELT***), contrat EV5V-CT94-0465, *1994-1998.*
- **MAST 3 (E.U.) :** Programme Fluxes Accross Narrow Shelves (***FANS***), contrat MAS3-CT95-0037**,** *1996-1999.*
- Programme National d'Océanographie Côtière (PNOC), *1994-1998.*

2.2 Comités scientifiques

- Membre du comité scientifique et chairman, 4th Int. Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, ERIM, 17-19 mars 1997, Orlando (Floride).
- Membre du comité scientifique et chairman, 5th Int. Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, ERIM, 5-7 octobre 1998, San Diego (Californie).

- Membre du comité scientifique, 6th Int. Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, ERIM, 4-6 mai 2000, Charleston (Caroline du Sud).
- Membre du comité scientifique et chairman, 7th Int. Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, Veridian-ERIM, 20-22 mai 2002, Miami (Floride).
- Membre du comité scientifique, 8th Int. Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, Altarum, automne 2004, Bergen (Norvège).

2.3 Revue d'articles

Water Research (3)

Remote Sensing of Environment (2)

Earth Surface Processes and Landforms (1)

Applied Optics (1)

Marine Geology (1)

Marine Ecology Progress Series (1)

Coral Reefs (1)

Int. J. Remote Sensing (1)

Télédétection (1)

Journal de Recherche Océanographique (1)

2.4 Expertises

- Evaluation de projets concernant le suivi des conséquences écologiques et écotoxicologiques de la marée noire due au naufrage de l'Erika, INERIS, février 2001.
- Evaluation d'un dossier soumis au Comité Scientifique du PNEC, appel d'offres 2003.
- Evaluation de projets pour le programme ZoNéCo, Nouvelle-Calédonie (Provinces, Etat), appel d'offres 2003.
- Plan POLMAR-MER (exercice), Nouméa, 18 déc. 2003 (devenir de nappes d'hydrocarbure).
- Evaluation d'un projet de thèse financée par l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), janvier 2004.
- Evaluation d'un dossier soumis au Comité Scientifique du PNEC, appel d'offres 2004.

2.5 Participation aux campagnes de mesures

Méditerranée : 11 campagnes de mesures de 2 à 15 jours

- Embouchure du Rhône, Nov. 94, campagne MODEPAR, navire CNRS/INSU "Professeur Georges-Petit", programmes PNOC et MEDDELT.
- Embouchure de l'Ebre, navire CNRS/INSU "Téthys II", FANS, campagnes franco-espagnoles :
  - Novembre 96, campagne FLIPER1,
  - Juillet 97, FLIPER3 (**chef de mission** avec J.J. Naudin et A. Cruzado),
- Embouchure du Rhône, Avr. 98 et Mars 99, BIODYPAR1 et BIODYPAR3, navire "Téthys II", PNOC.

- Golfe du Lion, Avril/Juin/Sept/Nov 2000 et Fév/Juin 2001, SARHYGOL 2 à 6, SARHYGOL 8, navire "Téthys II", PNEC.

Nouvelle-Calédonie

- 30 jours de mesures physiques dans le lagon (CTD, optique) à bord du N.O. Coris, IRD, 2001-2003

- **Chef de mission** de la campagne franco-australienne CAMECAL 5 (IRD-ANSTO), navire IRD "Alis", 19-27 Juin 2003, PNEC et ZoNéCo.

Fidji

- Lagon de Suva, Campagne BULA 3, navire IRD "ALIS", 12-19 avril 2003.

Les résumés des campagnes sur le Téthys II et sur l'Alis sont consultables sur le site web de SISMER : http://www.ifremer.fr/sismer/catal/campagne/campagne.htm

3. Encadrement scientifique

3.1 Thèses soutenues

Florence Lahet, "Caractérisation optique d'eaux côtières méditerranéennes : mesure, modélisation et inversion des réflectances. Application aux observations satellitales", 1996-1999, Bourse MRT, DEA *SEM*, Direction : P. Forget (50%), S. Ouillon (50%).

Thèse soutenue le 15 décembre 1999, mention *Très Honorable*.
Jury : Y. Lucas (président), A. Bricaud, J.M. Froidefond (rapporteurs), M. Petit, R. Santer, L. Wald, P. Forget, S. Ouillon. Publications : a.6, a.7, a.8, a.9 + Congrès b.8, b.10, b.12, b.14.

Actuellement : en CDD avec CLS Argos et l'US Espace (IRD Montpellier)

Nathalie Durand, "Modélisation numérique tridimensionnelle du panache de l'Ebre", 1996-2000, Bourse MRT, DEA *SEM*, Direction : P. Fraunié (50%), S. Ouillon (50%).

Thèse soutenue le 19 déc. 2000, mention *Très Honorable*.
Jury : L.A. Romaña (président), F. Brissaud, A. Palanquès (rapp.), A.G. Davies, P. Fraunié, S. Ouillon. Publications : a.11 + Congrès b.7, b.9, b.13, b.17, c.9.

Actuellement : ingénieur au BRGM

3.2 Thèse en cours

Aymeric Jouon "Modélisation intégrée du transport particulaire en milieux lagonaires", démarrage le 1er août 2003, Bourse ZoNéCo (Zone Economique de Nouvelle-Calédonie), Directeur de thèse : P. Fraunié, Encadrement scientifique: P. Douillet, S. Ouillon.

3.3 Stages de DEA ou de PFE

Natacha Papalopoulou "Modélisation hydro-écologique de la baie de Thessalonique", IMFT, DEA *Physique et Chimie de l'Environnement*, 1990. Direction : L. Masbernat, S. Ouillon.

Mohamed Aoun Nabli "Hydrodynamique du lac sud de Tunis", IMFT, DEA *Physique et Chimie de l'Environnement*, 1991. Direction : M. Moussa, S. Ouillon.

Florence Lahet "Signatures optiques des matières en suspension en milieu côtier : physique de la mesure", LSEET, DEA *Sciences de l'Environnement Marin (SEM)*, 1996. Direction : P. Forget, S. Ouillon.

Aurélien Paulmier "Modélisation du transport de matières en suspension dans le panache du Rhône", LSEET, DEA *Mécanique*, 1999, Direction : P. Fraunié, S. Ouillon, P. Broche.

Guillaume Reffray "Modélisation numérique haute précision du panache du Rhône", LSEET, DEA *SEM*, 2000, Direction : P. Fraunié, S. Ouillon.

Emmanuel Cordier "Modélisation du transport particulaire dans le lagon de Nouméa", IRD-LSEET, DEA européen *Modélisation de l'Environnement Marin*, 2000, Direction : S. Ouillon, P. Douillet.

Bastien Bouron-Morin "Modélisation de la dynamique des sédiments fins dans le lagon de Nouvelle-Calédonie", IRD-LSEET, DEA *Océanologie, Météorologie et Environnement* (Paris VI Option A) + PFE ENSTA, 2001, Direction : S. Ouillon, P. Douillet.

Ali Bel Madani "Modélisation du champ de vagues de vent dans le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie", IRD-LSEET, PFE ENSEEIHT, Juillet-Déc. 2003, Direction: P. Douillet, S. Ouillon.

Yasmine Bennouna "Influence de l'hétérogénéité du vent sur la circulation dans le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie", IRD-LSEET/LEPI, DEA *SEM*, Février-Juin 2004, Direction : G. Tedeschi, P. Douillet, S. Ouillon.

+ quelques stages de deuxième cycle

4. Activités d'enseignement

Enseignement 1989-1993

Moniteur 3 ans puis ATER 1 an à l'ENSEEIHT, filière "Hydraulique-Mécanique des fluides"

- Enseignement dispensé :

Matières	Cours (h)	TD (h)	TP (h)
Mécanique des fluides		24	52
Code de calcul	18	24	
Informatique			120
Hydraulique			80
Electrotechnique			132
Mécanique des milieux continus		12	

Co-organisation d'un séminaire de présentation du code PHOENICS, IMFT, 2 jours, 1991

Enseignement 1993-2001

Mon recrutement à l'Université de Toulon et du Var en 1993 s'est effectué sur création d'un poste de Maître de Conférences en section 37, lors de l'ouverture d'une maîtrise de "Physique et Applications, Mention Océan-Atmosphère" (PAMOA). De 1993 à 1999, mon service d'enseignement a été réparti entre la maîtrise PAMOA (80%), la licence PAMOA (10%) et le DEUG (10%). De 1999 à 2001, il a été réparti entre la maîtrise PAMOA (60%), le DESS "Mesure Instrumentation Surveillance Sol Atmosphère Océan" (20%) ouvert en septembre 99 et le DEUG (20%).

Services d'enseignement: environ 200 h eq. TD par an de 1993 à 2001.

Cycle	Matières	C (h/an)	TD (h/an)	TP (h/an)	Période
3ème	Codes de calcul (Phoenics/Fluent)	3		12	1999-2001
	Télédétection	6		18	1999-2001
	Initiation à Matlab			6	1999-2001
2ème	Mécanique des fluides		20	40	1993-2001
	Calcul numérique		15	20	1993-2001
	Dynamique des Fluides Géophysiques		20		2000-2001
	Physique statistique	15	15		1993-2000
				40	1993-2001
	Météorologie	20			1997-1999
			15		1993-1999
	Télédétection	3		25	1993-2001
1er	Physico-chimie du milieu naturel	30			2000-2001
	Physique			40	1993-1998
	Compléments de mathématiques		8		1994-1995

Activités pédagogiques

Outre la rédaction de fascicules d'enseignement dont la liste est consignée ci-dessous, les

efforts pédagogiques des années 1993-2001 ont été concrétisés par les points suivants :

- Création de Cours et TP de "Code de calcul en mécanique des fluides" (à l'ENSEEIHT en 1993 en collaboration avec D. Dartus, puis à l'UTV), acquisition du code PHOENICS à l'UTV en 1994, puis acquisition du code FLUENT en 1999,

- Création de Cours en Physique statistique et en Télédétection,

- Création de TD en Mécanique des fluides, Physique statistique, Calcul numérique, Météorologie, Dynamique des Fluides Géophysiques et Maths,

- Renouvellement des TP de maîtrise (rénovation des montages et des sujets, acquisition de matériel) :

- Mise en place de TP d'hydraulique-mécanique des fluides : couche limite en soufflerie, anémométrie à fil chaud, pertes de charges en conduite, ressaut hydraulique.
- Acquisition d'un canal pour l'étude du transport sédimentaire, et mise en place du TP correspondant,
- Achat de matériel pour l'enseignement de la physique statistique, et mise en place de TP : étude analogique de la distribution de vitesse de Maxwell, loi du rayonnement de Stefan-Boltzmann,

- Participation à l'acquisition du parc informatique de second cycle, département de physique,

- Gestion des salles de TP,

- Collaboration pédagogique avec le Québec (Institut Maurice Lamontagne) de 1997 à 2001 : envoi de stagiaires en 1997, 1999 et 2000,

- Suivi des étudiants après leur sortie de maîtrise, contacts avec les anciens étudiants, aide à la recherche de stages et d'emplois.

Supports pédagogiques

DARTUS D., OUILLON S. Code de calcul, cours polycopié ENSEEIHT, 100 pp., 1991.

OUILLON S. TP Mécanique des fluides - Compléments de physique, maîtrise, UTV, 1994 et suivantes.

OUILLON S. TP Télédétection, maîtrise, UTV, 1994.

OUILLON S. Eléments de physique statistique, Recueil d'exercices, maîtrise, 25 pp., 1997.

OUILLON S., FRAUNIE P. Dynamique des fluides, Recueil d'exercices, maîtrise, 20 pp., 1997.

OUILLON S., CROCHET M. Météorologie - Physique de l'atmosphère, Recueil d'exercices, licence, 40 pp., 1998.

OUILLON S., FRAUNIE P. Calcul numérique, Recueil d'exercices, maîtrise, 20 pp., 1998.

PRADO J., OUILLON S., Initiation à Matlab, ENST / UTV, 19 pp., 1999.

OUILLON S., MORELLE G. Winbilko version 2.0, Présentation et mode d'emploi, DESS, UTV, 12 pp., 2000.

FRAUNIE P., OUILLON S. Dynamique des fluides géophysiques, Exercices, maîtrise, 2001.

Commissions

Commission de spécialistes, section 60 du CNU, ENSEEIHT-INP Toulouse (nommé, 1995-97)

Commission de spécialistes, sections 35 et 37 du CNU, UTV (élu, 1995-2001)

5. Liste des travaux et publications

Revues à comité de lecture

a.1 OUILLON S., LE GUENNEC B., 1996. Modélisation du transport de matières en suspension non cohésives dans les écoulements 2D verticaux à surface libre, *J. Hydraulic Research*, AIRH, 34 (2), 219-236.

a.2 OUILLON S., FORGET P., FROIDEFOND J.M., NAUDIN J.J., 1997. Estimating suspended matter concentrations from SPOT data and from field measurements in the Rhône river plume, *Marine Technology Society J.*, ASME, 31 (2), 15-20.

a.3 OUILLON S., DARTUS D., 1997. Three-dimensional computation of flow around groyne, *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, 123 (11), 962-970.

a.4 OUILLON S., 1998. Erosion et transport solide : ampleur et enjeux, *la Houille Blanche*, 2, 52-58.

a.5 FORGET P., OUILLON S., 1998. Surface suspended matter off the Rhône river mouth from visible satellite imagery, *Oceanologica Acta*, 21 (6), 739-749.

a.6 FORGET P., OUILLON S., LAHET F., BROCHE P., 1999. Inversion of reflectance spectra of non-chlorophyllous turbid coastal waters, *Remote Sensing of Environment*, 68, 264-272.

a.7 LAHET F., OUILLON S., FORGET P., 2000. A three component model of ocean colour and its application in the Ebro river mouth area, *Remote Sensing of Environment*, 72, 2, 181-190.

a.8 LAHET F., FORGET P., OUILLON S., 2001. Application of a colour classification method to quantify the constituents of coastal waters from *in situ* reflectances sampled at satellite sensor wavebands, *Int. J. Remote Sensing*, 22 (5), 909-914.

a.9 LAHET F., OUILLON S., FORGET P., 2001. Colour classification of coastal waters of Ebro river plume from spectral reflectances, *Int. J. Remote Sensing*, 22 (9), 1639-1664.

a.10 DOUILLET P., OUILLON S., CORDIER E., 2001. A numerical model for fine suspended sediment transport in the southwest lagoon of New-Caledonia, *Coral Reefs*, 20 (4), 361-372.

a.11 DURAND N., FIANDRINO A., FRAUNIE P., OUILLON S., FORGET P., NAUDIN J.J., 2002. Suspended matter dispersion in the Ebro ROFI : an integrated approach, *Continental Shelf Research*, 22, 267-284.

a.12 OUILLON S., 2003. An inversion method for reflectance in stratified turbid waters, *Int. J. of Remote Sensing*, 24 (3), 535-548.

a.13 MESTRES M., SIERRA J.P., SANCHEZ-ARCILLA A., GONZALEZ DEL RIO J., WOLF T., RODRIGUEZ A., OUILLON S., 2003. Modelling of the Ebro River plume: validation with field observations. *Scientia Marina*, 67 (4), 379-391.

a.14 OUILLON S., DOUILLET P., ANDREFOUET S., 2004. Coupling satellite data with *in situ* measurements and numerical modeling to study fine suspended sediment transport : a study for the lagoon of New Caledonia, *Coral Reefs*, 23 (1), sous presse.

a.15 DOUILLET P., OUILLON S., FICHEZ R., PANCHE J.Y., Enhancement of regional variations in salinity and temperature in the southwest lagoon of New Caledonia, *Coral Reefs*, soumis.

a.16 OUILLON S., PETRENKO A. Chlorophyll-*a* estimation in the Gulf of Lions, Northwestern Mediterranean Sea : above-water measurements of reflectance and bio-optical algorithms, *Remote Sensing of Environment*, soumis.

a.17 FICHEZ R., CHIFFLET S., DOUILLET P., GERARD P., BUJAN S., BENSOUSSAN N., ROMANO J.C., TORRETON J.P., OUILLON S. Effect of terrigeneous and anthropogenic inputs on the spatial and temporal variability of water chemistry in a coral reef lagoon ecosystem. *Marine Pollution Bulletin*, soumis.

a.18 OUILLON S., DOUILLET P., CHEVILLON C., ANDREFOUET S., BOURON-MORIN B. Spatial variability of turbidity and erodability in a lagoonal system, New Caledonia (SW Pacific), *Continental Shelf Research*, en préparation.

a.19 OUILLON S., LUCAS Y., CHEVILLON C. Hyperspectral identification of sand at visible wavelengths in a remote sensing perspective over shallow waters, *Marine Geology*, en préparation.

a.20 LARCOMBE P., O'CALLAGHAN J., RIDD P., CHEVILLON C., DOUILLET P., OUILLON S., FICHEZ R.. Sediment transport in a sheltered tropical coastal embayment, Dumbea Bay, New Caledonia : implications for sediment dispersal. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, en préparation.

a.21 OUILLON S., DOUILLET P., FICHEZ R., JOUON A. Turbidity distribution and its variability in a coral reef lagoon, New Caledonia (SW Pacific): Analysis of a 5-year series of field data, *Marine Geology*, en préparation.

a.22 DOUILLET P., SCHMIED L., JOUON A., BEL MADANI A., OUILLON S. Comparison between numerical simulation of wind-wave distribution and wavemeter gauge measurements in a semi-enclosed lagoon, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, en préparation.

Contributions à ouvrages et actes de congrès internationaux

b.1 OUILLON S., CAUSSADE B., 1991. Numerical simulation and remote sensing, two techniques applied on the Gambia estuary, *Computer Methods in Water Resources 2*, 3, Ben Sari D., Brebbia C.A. et Ouazar D. ed., Springer Verlag, 209-220.

b.2 OUILLON S., DARTUS D. A porosity method to compute 3D free-surface flows, *Computational Modelling of Free and Moving Boundary Problems 2*, Wrobel L.C. et Brebbia C.A. ed., Comp. Mech. Publ., 177-184, 1993.

b.3 OUILLON S., LE GUENNEC B. Development of a 3D non cohesive sediment transport model for free-surface flows, *Water Pollution 2*, Brebbia C.A. et Wrobel L.C. ed., Comp. Mech. Publ., 201-208, 1993.

b.4 ARNOUX S., REY V., OUILLON S., FRAUNIE P. Three dimensional modelling of the Rhône deltaïc coastal zone, *Computer Modelling of Seas and Coastal Regions 2*, Brebbia C.A., Traversoni L. et Wrobel L.C. ed., Comp. Mech. Publ., 361-368, 1995.

b.5 OUILLON S., FORGET P., FROIDEFOND J.M., NAUDIN J.J. Estimating suspended matter concentrations from SPOT data and from field measurements in the Rhône river plume, Proc. *3rd Int. Conf. Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*, ERIM, 2, 200-209, Seattle, 18-20 sept. 1995.

b.6 ARNOUX S., BAECKEROOT A., BAGHDADI N., BROCHE P., DEVENON J.L., FORGET P., GAGGELLI J., DE MAISTRE J.C., OUILLON S., REY V., ROUGIER G. Field campaign off the Rhône river mouth, Proc. *2nd Int. Conf. Mediterranean Coastal Environment*, Medcoast 95, Ozhan E. ed., 869-882, Tarragona, 24-27 oct. 1995.

b.7 DURAND N., ARNOUX S., OUILLON S., REY V., FRAUNIE P. Etude tridimensionnelle du panache du Rhône, Proc. *Colloque Int. Apports fluviaux en Méditerranée*, ARPE, Nice, 9-10 oct. 1996.

b.8 OUILLON S., FORGET P., LAHET F., LUCAS Y. Optical properties of sediment-loading marine waters : First results on the influence of goethite, Proc. *4th Int. Conf. Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*, ERIM, 2, 13-22, Orlando, 17-19 mars 1997.

b.9 DURAND N., FIANDRINO A., OUILLON S., FRAUNIE P., FORGET P. Three-dimensional numerical study of the Ebro delta zone hydrodynamics, Proc. *3rd Int. Conf. Med. Coastal Env.*, Medcoast 97, Ozhan E. ed., 1111-1121, Malte, 11-14 nov. 1997.

b.10 FORGET P., OUILLON S., LAHET F., 1997. Modélisation et inversion des spectres de réflectance d'eaux turbides côtières, *Physical measurements and signatures in remote sensing*, G. Guyot et T. Phulpin ed., Balkema, vol. 2, 495-500.

b.11 OUILLON S., DURAND N., FORGET P., FIANDRINO A., FRAUNIE P. Remote sensing as a tool for suspended sediment transport modelling in coastal areas, Proc. *3rd Int. Conf. Multiphase Flow 98* (CD-Rom), ECL, Lyon, 8-12 juin 1998.

b.12 LAHET F., OUILLON S., FORGET P. Water quality and optical properties of coastal waters from hyperspectral data, Proc. *Oceans'98*, IEEE, 909-913, Nice, 28 sept-1 oct 1998.

b.13 DURAND N., OUILLON S., FRAUNIE P. Three-dimensional sediment transport modelling in the Ebro river plume, Proc. *Oceans'98*, IEEE, 762-766, Nice, 28 sept-1 oct 1998.

b.14 LAHET F., OUILLON S., FORGET P. Classification of coastal waters from hyperspectral and hydrological data, Proc. *5th Int. Conf. Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*, ERIM, 2, 298-305, San Diego, 5-7 oct 1998.

b.15 OUILLON S., FORGET P. Reflectance and sediment depth-profile in the Ebro river plume, Proc. *5th Int. Conf. Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*, ERIM, 2, 341-348, San Diego, 5-7 oct 1998.

b.16 ARNOUX-CHIAVASSA S., BROCHE P., DEVENON J.L., DURAND N., FIANDRINO A., FORGET P., FRAUNIE P., OUILLON S., REY V., Dispersion of suspended matter in a supercritical river plume discharging in a microtidal sea : an integrated approach, *Oceanic fronts and related phenomena,* Workshop rep. 159, IOC UNESCO, 15-21, Saint-Petersbourg, 18-22 mai 1998.

b.17 DURAND N., ARNOUX S., OUILLON S., REY V., FRAUNIE P., 1999. Three-dimensional plume of the Rhône river, *Mixing and dispersion in stably stratified flows*, P.A. Davies ed., Oxford Univ. Press, 341-353.

b.18 FORGET P., FRAUNIÉ P., OUILLON S. Visible and microwave signatures of river plumes in microtidal seas, conférence invitée, Proc. *2001 Int. Geoscience and Remote Sensing Symp. (CD-ROM)*, IEEE, Sydney, 9-12 juillet 2001.

b.19 OUILLON S., LUCAS Y., GAGGELLI J. Hyperspectral detection of sand, Proc. *7th Int. Conf. Remote Sensing for Marine and Coastal Environments (CD-ROM)*, ERIM-Veridian, Miami (Floride), 20-22 mai 2002.

b.20 OUILLON S., PETRENKO A., GAGGELLI J., GARCIA N., RIMMELIN P., DESCHAMPS P.-Y., BECU G., THIEULEUX F. Above water measurements of reflectance in the Gulf of Lions, Proc. *7th Int. Conf. Remote Sensing for Marine and Coastal Environments (CD-ROM)*, ERIM-Veridian, Miami (Floride), 20-22 mai 2002.

Congrès internationaux sans actes

c.1 OUILLON S. Digital simulation and space imaging, IAF paper ST-90-017*, 41st Congress International Astronautical Federation*, Dresden, 6-12 oct. 1990.

c.2 BROCHE P., GAGGELLI J., DE MAISTRE J.C., DEVENON J.L., FORGET P., ROUGIER G., OUILLON S., ARNOUX S., REY V., BAECKEROOT A., BAGHDADI N., FRAUNIE P. Remote sensing of a river plume by VHF doppler radars, WMO/IOC *Workshop Operational Ocean Monitoring using Surface-based Radars*, World Meteorological Headquarters, Genève, 6-8 mars 1995.

c.3 FORGET P., OUILLON S. Distribution de Matières En Suspension au débouché du Rhône par imagerie SPOT et Landsat-TM, poster, *Int. Symp. Operational oceanography and satellite observation*, Biarritz, 16-20 oct. 1995.

c.4 OUILLON S., FORGET P., DURAND N., GAGGELLI J., NAUDIN J.J. Suspended matter distribution in the Ebro river plume by use of SPOT XS data, poster, *4th Int. Conf. Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*, ERIM, Orlando, 17-19 mars 1997.

c.5 ARNOUX-CHIAVASSA S., DURAND N., REY V., OUILLON S., DEVENON J.L., FORGET P., FRAUNIE P., BROCHE P., FIANDRINO A., DANAILA I., ANGOT P., NAUDIN J.J. Analysis of the vertical dispersion in a river plume discharging in a microtidal sea, *Eur. Geoph. Soc. XXIII Gen. Assembly*, Nice, 20-24 avril 1998.

c.6 ARNOUX-CHIAVASSA S., DURAND N., DEVENON J.L., OUILLON S., REY V., FORGET P., FRAUNIE P., NAUDIN J.J. Dynamics of a river plume in Mediterranean sea when driven by wind, *Eur. Geoph. Soc. XXIII Gen. Assembly*, Nice, 20-24 avril 1998.

c.7 ARNOUX-CHIAVASSA S., BERRABAA S., OUILLON S., REY V., FRAUNIE P., FIANDRINO A., DANAILA I., ANGOT P. Modelling the vertical dispersion in a supercritical river plume discharging in a microtidal sea, *Oceanic fronts and related phenomena, K. Fedorov memorial Symp.*, Saint-Petersbourg, 18-22 mai 1998.

c.8 DAVIES A.M., DURAND N., FORGET P., FRAUNIE P., OUILLON S., XING J., NAUDIN J.J. Suspended matter dispersion in a mediterranean ROFI, *Eur. Geoph. Soc. XXIV Gen. Assembly*, La Haye, 19-23 avril 1999.

c.9 DURAND N., OUILLON S., FRAUNIE P. The Ebro delta plume : 3D study from numerical modelling and field data, *31st Int. Liège Colloquium on Ocean Hydrodynamics*, Liège, 3-7 mai 1999.

c.10 REFFRAY G., DIMITROV G., DEVENON J.L., FRAUNIE P., OUILLON S., FORGET P. High order simulation of mediterranean river plumes, *JONSMOD / MEDMOD 2000*, La Londe-les-Maures, 9-12 juillet 2000.

c.11 DOUILLET P., OUILLON S., CORDIER E. Modelisation of the transfer of dissolved and particulate material in the south-western lagoon of New Caledonia, *9th Int. Coral Reef Symp.*, ISRS, Bali, 23-27 oct. 2000.

c.12 OUILLON S., DOUILLET P., ANDREFOUET S. Dynamics of suspended particulate matter in coral reef lagoons, exposé, *2nd Pacific Ocean region Workshop "Remote Sensing for Management of Coral Reefs and Sustainable Fisheries"*, IOCCG, University of Queensland, Brisbane, 30 sept.-3 oct. 2003

c.13 OUILLON S., DOUILLET P., SCHMIED L., ANDREFOUET S., CHEVILLON C., JOUON A., FICHEZ R. An integrated study of fine suspended sediment transport in a coral reef lagoon, New-Caledonia, exposé, *10th Int. Coral Reef Symp.*, ISRS, Okinawa, Japon, 28 juin-2 juillet 2004

c.14 DOUILLET P., SCHMIED L., JOUON A., BEL MADANI A., OUILLON S. Comparison between numerical simulation of wind-wave distribution and wavemeter gauge measurements in a semi-enclosed lagoon, poster, *10th Int. Coral Reef Symp.*, ISRS, Okinawa, Japon, 28 juin-2 juillet 2004

c.15 JOUON A., DOUILLET P., OUILLON S., FRAUNIE P. Water residence time and water renewal time in a coral reef lagoon, New Caledonia, poster, *10th Int. Coral Reef Symp.*, ISRS, Okinawa, Japon, 28 juin-2 juillet 2004

Rapports de contrat

CAUSSADE B., AJDOR Y., CHORDA J., JEAN C., OUILLON S. Modèle de suivi de la qualité des eaux d'une rivière en aval d'une usine, rapport final, contrat SNEAP, H5, IMFT, 1990.

OUILLON S., DARTUS D., LE GUENNEC B. Transport de suspensions en écoulements à surface libre, rapport final, contrat 9100962, Conseil Rég. Midi-Pyrénées, IMFT, 1992.

OUILLON S., FRAUNIE P., FORGET P., DURAND N., FIANDRINO A., ARNOUX S., LAHET F., ROUGIER G., GAGGELLI J. Remote sensing and numerical modelling on the Ebro river plume in July 1997, rapport intermédiaire à 2 ans, contrat FANS (MAST3), CE, LSEET-UPC, 1998.

Thèse et rapports universitaires

OUILLON S. Etudes des systèmes d'évacuation d'eau pour la galerie d'amenée de la centrale d'Eget, rapport de stage d'élève-ingénieur ENSEEIHT, SNCF, Toulouse, 1988.

OUILLON S. Modèle de courantologie en estuaire, rapport de stage de DEA, IMFT, 1989.

OUILLON S., CAUSSADE B. Modélisation mathématique de l'hydrodynamique et du transport d'un constituant passif dans l'estuaire du fleuve Gambie : aide à l'interprétation d'images satellitaires, rapport H 1, IMFT, 1990.

LINE A., OUILLON S. Code MEFAME (Méthode Aux Eléments Finis Appliquée à la Modélisation Environnementale) - Présentation, rapport interne IMFT, 1990.

OUILLON S., MAILLARD S. Initiation au code PHOENICS, rapport interne IMFT, 1991.

OUILLON S. Modélisation mathématique de l'hydrodynamique à surface libre et du transport en suspension de sédiments non cohésifs, aide à l'interprétation d'images spatiales, Thèse de Doctorat de l'INPT, n°694, Spécialité Physique et Chimie de l'Environnement, IMFT, 1993.

Autres communications, colloques, séminaires

OUILLON S., DARTUS D. Initiation à l'utilisation du code PHOENICS, *Séminaire IMFT*, 1992.

OUILLON S. Hydrodynamique et transport de matières en suspension à l'embouchure du fleuve Gambie, poster, *Journées d'échanges du CRAM*, Tunisie, 1992.

OUILLON S. Modélisation d'écoulements côtiers à surface libre et de transport de suspensions non cohésives, *Journées de la Mécanique des Fluides Numérique*, IMFT, Toulouse, 1993.

BROCHE P., DEVENON J.L., GAGGELLI J., DE MAISTRE J.C., FORGET P., OUILLON S. Courantométrie de surface par radar VHF - Principes et exemple : Observation du panache du Rhône, *Colloque Dynamique Océanique Côtière*, Comité National Français de Géodésie et Géophysique, Paris, 17-18 mai 1995.

FORGET P., OUILLON S. Total suspended matter estimated from satellite imagery, *FANS (MAST3) Plenary Meeting*, Barcelone, 10-12 oct. 1996.

FORGET P., OUILLON S. Inversion of SPOT satellite imagery during Fliper1, *FANS (MAST3) Workshop*, Banyuls-sur-mer, 12 mars 1997.

OUILLON S. Transport sédimentaire en zones côtières : Application de la télédétection visible aux embouchures du Rhône et de l'Ebre, *Séminaire LSEET*, La Garde, 28 avril 1997.

OUILLON S., FORGET P., DURAND N., FIANDRINO A., LAHET F., GAGGELLI J., FRAUNIE P., NAUDIN J.J., ORIOL L. Water color in the Ebro mouth area to study the suspended matter distribution, *FANS (MAST3) Plenary Meeting*, Blanes (Esp), 21-23 mai 1997.

FORGET P., OUILLON S. Total suspended matter estimated from SPOT and Landsat imagery, *FANS (MAST3) Plenary Meeting*, Blanes (Esp), 21-23 mai 1997.

DURAND N., FIANDRINO A., OUILLON S., FRAUNIE P. Three-dimensional modelling of the Ebro delta circulation, *FANS (MAST3) Plenary Meeting*, Blanes (Esp), 21-23 mai 1997.

OUILLON S., FORGET P. SPOT imagery inversion during FLIPER3 cruise, *FANS (MAST3) Workshop*, Toulon, 10-11 nov. 1997.

NAUDIN J.J., ORIOL L., DURAND N., FORGET P., FRAUNIE P., OUILLON S., MOVELLAN E. Synoptic circulation around the Ebro delta : the river plume domain, *FANS (MAST3) Plenary Meeting*, Bangor (Pays de Galles), 6-8 mai 1998.

OUILLON S., FRAUNIÉ P., FORGET P., DURAND N., FIANDRINO A., ARNOUX A., LAHET F., ROUGIER G., GAGGELLI J., Remote sensing and numerical modelling on the Ebro river plume in July, 1997, *FANS (MAST3) Plenary Meeting*, Bangor (Pays de Galles), 6-8 mai 1998.

BOURON-MORIN B., DOUILLET P., OUILLON S., CHEVILLON C., FICHEZ R. Modélisation numérique du transport de vase et de sable dans le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie, *27^{eme} Colloque de l'Union des Océanographes de France*, Villeneuve d'Asq, 5-7 sept. 2001.

PETRENKO A., LEREDDE Y., GARCIA N., RIMMELIN P., ROUGIER G., ESTOURNEL C., GAGGELLI J., OUILLON S., 2001. Suivi Automatique Régulier de l'Hydrologie du Golfe du Lion et Modélisation, poster, *Journées de prospective du PATOM*, 11-12 octobre 2001, Paris.

OUILLON S., DOUILLET P., SCHMIED L. Dynamique particulaire dans le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie : mesures, modélisation et télédétection, *Séminaire,* Nouméa, 18 Sept. 2002.

FICHEZ R., BREAU L., MORETON B., CHEVILLON C., DOUILLET P., OUILLON S. The fate of terrigenous and anthropogenic metals in the South-West lagoon of New Caledonia, exposé, *Séminaire PECC (Pacific Economic Cooperation Council)*, Centre JM. Tjibaou, Nouméa, 4-8 nov. 2002.

PETRENKO A., GAGGELLI J., GARCIA N., GOYER C., LEREDDE Y., OUILLON S., RIMMELIN P., ROUGIER G. 2002. Suivi hydrologique et biogéochimique dans le Golfe du Lion: les campagnes SARHYGOL (Suivi Automatique Régulier de l'Hydrologie dans le Golfe du Lion), in *Colloque CIRMED*, edité par l'INSU, pp. 15, Banyuls-sur-mer, 2002.

DOUILLET P., OUILLON S., CHEVILLON C., SCHMIED L. Hydrodynamique et transport côtier dans le chantier Nouvelle-Calédonie du PNEC : bilan et perspectives, exposé, *Journées de prospective du PNEC,* Banyuls-sur-mer, 17 Déc. 2002.

Deuxième Partie

SYNTHESE DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Homme libre, toujours tu chériras la mer !
La mer est ton miroir ; tu contemples ton âme
Dans le déroulement infini de sa lame,
Et ton esprit n'est pas un gouffre moins amer.

Vous êtes tous les deux ténébreux et discrets :
Homme nul n'a sondé le fond de tes abîmes,
Ô mer, nul ne connaît tes richesses intimes,
Tant vous êtes jaloux de garder vos secrets !

Baudelaire *L'Homme et la Mer*

1. Introduction

1.1 Dynamique particulaire en zones côtières : intérêts et enjeux

Les particules transportées en eaux fluviales et en zones côtières façonnent les paysages et véhiculent éléments et polluants. La dynamique des sédiments grossiers conditionne pour l'essentiel la morphodynamique consécutivement aux processus d'érosion, de transport et de dépôt. Les particules fines en suspension draînent quant à elles de nombreuses substances chimiques ou métalliques dans les environnements aquatiques. Elles constituent le trait d'union essentiel entre les éléments chimiques, la colonne d'eau, le lit sédimentaire et la chaîne trophique [Turner et Millward 2002].

Les flux particulaires modifient à la fois les milieux d'origine, les zones de transit et les milieux récepteurs. Ils appauvrissent ou enrichissent, inhibent ou fertilisent, suivant un régime en évolution perpétuelle. Les activités humaines influent sur la dynamique particulaire (rejets industriels et urbains, aménagement du territoire, érosion accrue des sols, activités minières, aquaculture…). Les modifications climatiques ont également un impact sur la dynamique particulaire dès lors qu'elles modifient, par exemple, le régime hydrologique ou le niveau de la mer. Un article présenté en annexe rappelle quelques chiffres relatifs à l'ampleur, aux enjeux et aux impacts du transport particulaire en domaines fluvial et côtier [Ouillon 1998].

Etudier la dynamique particulaire a ainsi pour objet la **connaissance et la quantification des flux particulaires** induits par différents forçages, dans le but de pouvoir les simuler et d'**évaluer l'impact d'activités anthropiques et de modifications climatiques sur les milieux**. Connaître la dynamique particulaire est ainsi utile *stricto sensu* (morphodynamique) et essentiel pour les études géochimiques et biologiques, pour améliorer la connaissance des cycles élémentaires et des flux de

polluants adsorbés ou dissous, et pour en évaluer les conséquences sur, par exemple, la production primaire et les écosystèmes, la répartition des habitats ou la qualité des eaux.

L'intérêt scientifique spécifique des zones côtières tient au fait de la grande variété des processus biotiques et abiotiques imbriqués, de la richesse des systèmes biologiques, de l'importance des aspects socio-économiques de ces zones et de l'interrelation entre tous ces facteurs. La dynamique particulaire est l'un des thèmes qui illustrent ces relations complexes. Les questions posées initialement à la communauté scientifique et relatives aux particules, à savoir la modification du trait de côte et le transport de contaminants adsorbés, sont fortement en prise avec les activités humaines. La connaissance du transport particulaire est donc primordiale pour répondre aux questions d'aménagement et de contamination dans des régions où la population croît plus rapidement que la moyenne mondiale (le Programme des Nations Unies pour l'Environnement PNUE prévoit que 75 pour cent de la population mondiale vivra à moins de 60 kilomètres du littoral en 2030 contre 60 pour cent actuellement, soit 6.4 milliards estimés contre 3.6 milliards actuellement).

1.2 Objet et méthodes

Le milieu naturel est beaucoup plus complexe que les canaux de laboratoire ou les "cuves numériques" dans lesquels on peut isoler l'étude d'un processus. En dynamique sédimentaire, les mesures de terrain à des fins de recherche sont souvent très localisées, dans une couche limite ou au voisinage d'une couche de mélange. Les études qui en résultent visent à mieux comprendre les mécanismes imbriqués et à en améliorer la simulation, le modèle numérique fournissant un support à l'analyse.

Pour ma part, et ce dès mes travaux de DEA, mon centre d'intérêt a principalement été porté sur la variabilité spatio-temporelle de la **dynamique sédimentaire dans des milieux fortement hétérogènes** et sur des domaines d'étendue typique des zones côtières (lagon de Nouvelle-Calédonie), panaches fluviaux (panaches du Rhône et de l'Ebre), estuaire (fleuve Gambie), soit sur des zones de plusieurs centaines de km^2. Etant donnée la variabilité spatiale des phénomènes d'érosion, de dépôt, de remise en suspension comme on en verra des illustrations dans ce rapport, mon travail s'est d'abord tourné vers la mise en place en équipe de méthodes et d'outils adaptés aux sites : modèles numériques de transport, données satellitales visibles (couleur de l'eau) et mesures de terrain. Mes travaux ont toujours visé une adaptation et une intégration de ces outils afin de tirer le plus d'informations possibles de leur utilisation conjointe, dans le but d'améliorer notre compréhension des mécanismes engagés. Lorsque l'on s'intéresse aux milieux naturels, cette approche constitue un complément indispensable aux études de processus vers lesquelles s'orientent à présent mes travaux.

L'originalité de mon travail réside dans l'emploi d'outils (modèles, images) issus de champs disciplinaires généralement disjoints. Mes recherches ont été naturellement influencées par les spécificités des équipes auxquelles j'ai été successivement rattaché :

- le groupe "Hydrodynamique de l'environnement" de l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (**IMFT**, UMR CNRS 5502), de 1989 à 1993,
- l'équipe "Océanographie Côtière" du Laboratoire de Sondages Electromagnétiques de l'Environnement Terrestre (**LSEET**, UMR CNRS 6017), de 1993 à 2001, à laquelle j'étais rattaché en qualité de Maître de conférences à l'Université de Toulon et du Var,
- l'Unité de Recherche "CAractérisation et Modélisation des Echanges dans les Lagons sous Influences terrigènes et Anthropiques" (**CAMELIA**, UR 103 IRD, dir. : Renaud Fichez) à Nouméa, depuis septembre 2001, sur un poste d'accueil en détachement.

1.3 Contexte et programmes

IMFT 1989-1993

C'est tout d'abord au contexte toulousain spécifique que je dois d'avoir démarré ma recherche combinant modèles et images satellitales. Le premier satellite civil français d'observation de la terre, SPOT 1, a été lancé en 1986. Guy Flouzat du CESR (Centre d'Etudes Spatiales du Rayonnement - UMR CNRS, Toulouse) a dirigé dans les années 1986-1990 un "Programme d'Evaluation Préliminaire de SPOT" (PEPS) consacré au bassin versant de la Gambie pour lequel il disposait entre autres de deux images SPOT de l'embouchure du fleuve. Bernard Caussade, DR CNRS à l'IMFT, en connexion avec G. Flouzat, m'a alors proposé en 1989 un sujet de DEA "à titre exploratoire" sur l'aide que pouvait apporter la simulation numérique du transport particulaire dans l'interprétation d'images satellitales visibles, en marge du PEPS mais s'appuyant sur les données fournies par le programme. L'étude de la Gambie, faute de mesures spécifiques de terrain, n'a pu être que relativement qualitative et n'a pas donné lieu à d'autre publication que dans un acte de congrès [Ouillon et Caussade 1991, en annexe], cependant cette première étude a porté les germes de celles que j'ai menées par la suite.

Mes premiers travaux en modélisation, en 1989-1990, reposaient sur un code aux éléments finis résolvant les équations de Barré de Saint-Venant en 2D également appelées "équations en eaux peu profondes". Je dois beaucoup à Alain Liné, actuellement professeur à l'INSA de Toulouse, qui a accompagné et largement soutenu mon apprentissage de ce code.

A la suite du travail sur la Gambie, la nécessité de disposer d'un modèle 3D de circulation et de transport est clairement apparue pour traiter de situations réellement tridimensionnelles, mieux estimer les contraintes de cisaillement au fond, et pouvoir extraire les résultats de simulations sur une couche de surface pour une comparaison plus propice avec les champs de turbidité issus de données spatiales. J'ai alors rejoint l'équipe "Transport solide" de l'IMFT qui, sous l'impulsion de Benoît Le Guennec, Denis Dartus et André Bachoc, travaillait à l'époque à la mesure du transport particulaire et au développement de modèles pour les réseaux d'assainissement. Profitant de leur expérience et de leur savoir-faire, j'ai développé dans les années 1990-1993 des modules numériques pour adapter un modèle numérique 3D initialement à toit rigide (1) aux écoulements à surface libre et (2) au transport de Matières En Suspension (MES). Ce travail a donné lieu à deux contrats avec la région Midi-Pyrénées. En l'absence de données spécifiques, j'ai validé les modèles à partir de cas-tests d'écoulement en canal disponibles dans la littérature.

LSEET 1993-2001

Depuis sa fondation dans les années 70, le LSEET focalise ses travaux sur le développement instrumental et les applications de mesures de télédétection pour l'étude physique de l'océan et de l'atmosphère. Alors que le radar océanographique VHF développé par le LSEET était opérationnel [Broche *et al.* 1983, 1998; Devenon *et al.* 1992], Pierre Broche encouragea le développement de compétences complémentaires en modélisation numérique dans l'équipe "Océanographie côtière". Jean-Luc Devenon fut recruté à la fin des années 80. En 1992, la MST "Mer" de l'Université de Toulon et du Var se scinda en deux formations, l'option Génie Côtier de l'Institut des Sciences de l'Ingénieur de Toulon et du Var (ISITV) et le second cycle universitaire en Physique Appliquée, Mention "Océan-Atmosphère" (PAMOA). Les recrutements d'enseignants-chercheurs autorisés par cette opportunité permirent ainsi à Vincent Rey (en 1992), Philippe Fraunié et moi-même (en 1993) de rejoindre l'équipe "Océanographie Côtière" du LSEET.

Du fait de mon expérience -pourtant réduite- en télédétection visible sur le panache de la Gambie, il me fut alors demandé de mettre en place au LSEET un axe de recherche relatif aux applications de la télédétection passive (couleur de l'eau) en eaux côtières en collaboration avec Philippe Forget, CR CNRS. Cet axe avait pour vocation de compléter le panel des données synoptiques disponibles pour tester, nourrir et valider les modèles côtiers et tenter d'aller ainsi plus loin dans l'analyse

physique des écoulements côtiers. En parallèle d'une activité en télédétection, j'ai participé au développement de modèles numériques, essentiellement pour l'aspect "transport de MES".

Ces travaux se sont inscrits dans le cadre du PNOC (Programme National d'Océanographie Côtière) et de 2 projets européens auxquels le LSEET a participé : le projet MEDDELT (1994-98), financé par le programme Environment et le projet FANS (1996-99) financé par le programme MAST-III. Dans MEDDELT, les équipes travaillaient sur les embouchures de 3 grands fleuves méditerranéens, le Pô, le Rhône et l'Ebre, notre participation concernant plus spécifiquement le panache fluvial du Rhône. FANS était en revanche dédié à la seule embouchure de l'Ebre, principal fleuve espagnol débouchant en Méditerranée. Au cours du XXème siècle, les apports de l'Ebre au domaine marin ont connu une forte diminution consécutive à l'aménagement du bassin versant. L'utilisation simultanée de données *in situ*, satellitales et numériques a servi de socle à notre étude relative à l'impact actuel du fleuve sur le milieu marin.

1999-2000 a constitué une période charnière pour le laboratoire comme pour moi. Les grands programmes européens au sein desquels nous avions travaillé depuis 1993 étaient terminés et les deux étudiantes que j'avais co-encadrées au cours du programme FANS ont soutenu leur thèse, en 1999 pour Florence Lahet et en 2000 pour Nathalie Durand. Le LSEET n'avait alors momentanément plus de grand projet fédérateur en océanographie côtière comme MEDDELT et FANS l'avaient été. C'est à cette époque que j'ai entamé deux nouvelles collaborations extérieures, l'une avec Anne Petrenko du Centre Océanologique de Marseille (COM) dans le cadre double du programme SARHYGOL soutenu par le chantier Golfe du Lion du PNEC et du programme SARHYM soutenu par le PATOM, l'autre avec Renaud Fichez et Pascal Douillet de l'UR CAMELIA de l'IRD dans le cadre du chantier Nouvelle-Calédonie du PNEC.

Le programme SARHYGOL (Suivi Automatique et Régulier de l'Hydrologie du GOLfe du Lion) consistait à effectuer des mesures de courant (via l'ADCP de coque du "Téthys 2") et des mesures complémentaires sur un trajet prédéfini couvrant une large surface du Golfe du Lion, le plus rapidement possible -soit en deux jours- et suivant un échantillonnage régulier, tous les deux mois. L'objectif de ces mesures était de fournir une couverture quasi-synoptique et quasi-instantanée des courants et de l'hydrologie du Golfe pour en étudier la structure interne, la variabilité, et fournir à l'occasion des données pour les simulations numériques méso-échelle entreprises au Laboratoire d'Aérologie sous l'égide de C. Estournel et P. Marsaleix. A. Petrenko m'a invité à profiter des campagnes SARHYGOL pour effectuer régulièrement des mesures spectroradiométriques de surface dans le Golfe du Lion. L'objectif de ces mesures était double : (1) comparer des mesures de réflectance de surface polarisées et non polarisées; (2) analyser la variabilité spatiale de réflectance dans le Golfe pour valider les algorithmes généraux d'inversion optique en terme de chlorophylle ou en proposer des alternatives.

Le chantier Nouvelle-Calédonie du PNEC, issu d'un programme que soutenait auparavant le Programme National de Recherche sur les Récifs Coralliens (PNRCO), a démarré en 2000 sous la direction de Renaud Fichez. Sur le plan de la physique côtière, le chantier Nouvelle-Calédonie du PNEC reposait essentiellement sur Pascal Douillet (IRD) aux talents multiples en hydrodynamique (mesures *in situ*, modélisation, analyse) comme en analyse numérique. R. Fichez m'a proposé de rejoindre l'équipe impliquée dans le chantier pour travailler sur le transport particulaire dans le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. Cette collaboration a démarré par le co-encadrement avec P. Douillet des stages de DEA d'Emmanuel Cordier en 2000 et de Bastien Bouron-Morin en 2001, puis par mon détachement à l'IRD sur un poste d'accueil en détachement en septembre 2001.

UR CAMELIA de l'IRD depuis 2001

La France, avec 55 000 km^2 de récifs coralliens dans les trois océans tropicaux soit près de 10% des récifs mondiaux, est responsable d'un des plus grands linéaires côtiers de récifs coralliens. Le lagon de Nouvelle-Calédonie, d'une superficie globale de 24 000 km^2, est le deuxième au monde en longueur après le Récif de la Grande Barrière en Australie. Les milieux coralliens ont une grande importance sur les plans environnemental (biodiversité exceptionnelle), culturel et socio-

économique, notamment pour la pêche et le tourisme. Ils abritent cependant des écosystèmes fragiles, très sensibles aux apports anthropiques et aux modifications du climat.

Depuis les 15 dernières années, les phénomènes de blanchissement des coraux ont augmenté en nombre et en intensité, avec une pointe en 1998 qui s'est traduite par la dévastation de nombreux récifs sur l'ensemble de la planète. Ce phénomène, lié à l'expulsion prolongée des zooxanthelles, est provoqué par l'augmentation de la température de l'eau et la modification d'autres paramètres physiques du milieu (rayonnement UV, salinité, turbidité...). Un second problème auquel les milieux coralliens ont à faire face concerne les modifications du niveau de la mer qui sont attendues à des ampleurs croissantes dans les décennies à venir. Enfin, indépendamment des modifications climatiques, les îles comme toutes les zones côtières connaissent une population croissante qui appelle un développement économique et une utilisation de plus en plus massive des ressources marines et terrestres. En Nouvelle-Calédonie où le nickel constitue la principale ressource du territoire, l'implantation de nouvelles mines prévues à moyen terme, par exemple, aura un impact sur les écosystèmes du lagon du fait des métaux dissous ou fixés sur les particules, impact qu'il faut évaluer, ce qui nécessite une bonne connaissance du fonctionnement physique et biologique du site.

Dans ce contexte, un vaste programme d'étude du lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie avait été initié en 1996 (ECOTROPE) à l'initiative de Jacques Clavier. R. Fichez en a repris la direction à la fin des années 90 au sein de l'UR CAMELIA de l'IRD, d'une part, et dans le cadre du chantier Nouvelle-Calédonie du PNEC, d'autre part.

Le chantier du PNEC étudie plus spécifiquement la partie sud-ouest du lagon de la Grande Terre (cf fig. 1.1), d'une superficie d'environ 2000 km^2. Ce site, qui inclue les baies de Nouméa et les baies adjacentes où vivent plus de la moitié de la population de Nouvelle-Calédonie, a été choisi parce que le programme vise à évaluer les impacts anthropiques sur le milieu côtier.

Pour quantifier l'effet de perturbations naturelles ou anthropiques sur les ressources des écosystèmes coralliens, il faut mettre en place des moyens de mesures et d'observation efficaces et autant que possible peu onéreux. La télédétection satellitale, sans se substituer aux mesures de terrain, peut répondre en partie à ce besoin. Il faut en parallèle définir des outils permettant de mieux comprendre le fonctionnement de ces écosystèmes et de simuler leur évolution sous l'effet de contraintes extérieures variables. La modélisation est l'outil privilégié de compréhension et de simulation.

Ma participation à l'UR CAMELIA et au chantier PNEC avait pour objectif de mettre en place une étude intégrée du transport particulaire s'appuyant à la fois sur la modélisation, la télédétection et les mesures de terrain dans le cadre d'un travail d'équipe. Les développements de chacun de ces axes, ainsi que leur synergie, ont donné lieu à plusieurs projets de recherche complémentaires (cf p.2) financés :

- par l'ACI " Observation de la Terre " en télédétection : projets ID-ROM en 2001-2002 et BISSECOTE en 2004-2005,
- par le programme ZoNéCo en modélisation : thèse d'Aymeric Jouon (2003-2006),
- par la NASA en ce qui concerne le lien modélisation-télédétection (2004-2007).

Depuis 2001, la gestion de projets fait ainsi partie de mes activités. Les projets ID-ROM puis BISSECOTE m'ont initiés à l'élaboration et à la direction de projets. En 2003, suite aux travaux que nous avions entrepris en commun [Ouillon *et al.* 2004], Serge Andréfouët nous a demandé de rejoindre une équipe internationale pour participer à un projet concernant l'utilisation conjointe de modélisation numérique et de télédétection en milieux coralliens. Par ce projet, financé par le prestigieux programme interdisciplinaire (IDS) de la NASA, <u>le lagon de Nouvelle-Calédonie devient l'un des 3 sites pilote d'étude des milieux coralliens de la NASA, avec la Grande Barrière de Corail et l'ensemble des Caraïbes</u>. Ce projet confère ainsi un label de reconnaissance internationale

du site parmi la communauté des chercheurs en milieux coralliens. Outre les aspects financiers, le projet va également nous permettre de travailler avec des équipes renommées (liste p.2).

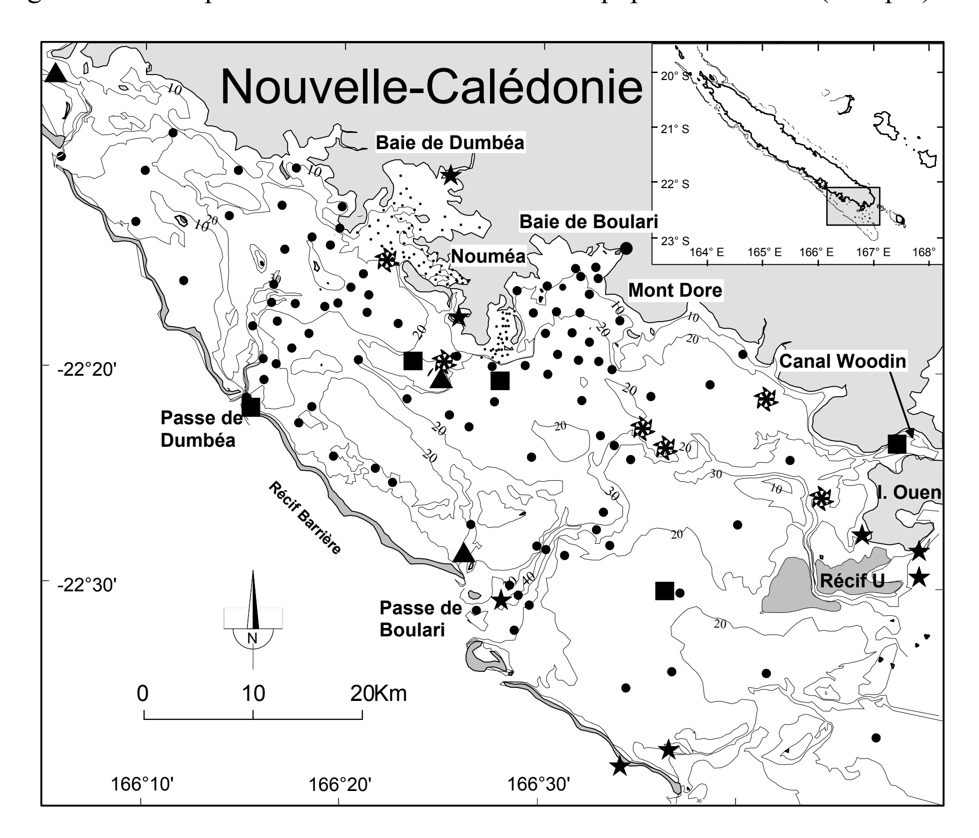


Fig. 1.1 *Lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie.*
Emplacements des stations de mesure : courantomètre (■), station météorologique (▲), marégraphe (★), profil CTD (●), courantomètre ADCP (❄). Les isobathes dont exprimées en mètres.

1.4 Plan de la présentation

Les chapitres 2, 3 et 4 présentés à la suite sont thématiques et présentent une synthèse de mes activités de recherche relatives à la mise au point et à la mise en œuvre de modèles numériques d'hydrodynamique et de transport de Matières En Suspension (chapitre 2), aux applications de la mesure optique en zones côtières (chapitre 3) et aux études de sites intégrées qui s'appuient conjointement sur des mesures, des données de télédétection et des simulations numériques (chapitre 4). Le contexte de ces recherches (programmes, campagnes de mesure) et les activités annexes qui en ont découlé (expertises, revues d'articles, commissions scientifiques) ont été brièvement présentés en partie 1 ("Résumé de carrière"). Ils ne seront pas repris dans cette partie. En revanche, les encadrements de stages et de thèses auxquels ces travaux ont donné lieu seront mentionnés. Les chapitres 2 à 4 ne présentent qu'une synthèse des travaux engagés et des principaux résultats. Pour approfondir chacun des sujets abordés, le lecteur trouvera en annexe les articles auxquels ces travaux ont donné lieu. Le mémoire se termine par un chapitre (chap. 5) évoquant mes projets et perspectives en matière de recherche établis sur la base de ma situation actuelle.

2. Modèles numériques d'hydrodynamique et de transport particulaire

En physique, on ne comprend que ce que l'on est capable de modéliser.

Lord Kelvin

La prévision est un art difficile, surtout lorsqu'elle porte sur l'avenir.

Sir W. Churchill

2.1 Hydraulique numérique, canaux, estuaires

Modélisation hydrodynamique de l'estuaire du fleuve Gambie [Ouillon et Caussade 1991]

Mes premiers travaux à l'IMFT ont concerné l'adaptation à l'embouchure du fleuve Gambie d'un code aux éléments finis résolvant les équations 2D horizontales d'écoulement en eaux peu profondes. Il s'agissait de reconstituer les champs hydrodynamiques et de Matières En Suspension (MES) dans le panache fluvial afin d'aider à l'interprétation de deux images SPOT traitées au CESR.

Les développements numériques ont été réalisés à partir du code MEFAME (Méthode aux Elements Finis Appliquée à la Modélisation Environnementale) qui avait été établi par Liné suivant la structure du programme MEF proposé par Dhatt et Thouzot (1981). Ce code résolvait initialement les équations d'écoulements 2DH à surface libre en milieux fermés (lacs). Son application au fleuve Gambie m'a notamment conduit à mettre au point un modèle 1D pour reproduire la propagation de la marée dans l'estuaire, le couplage des modèles 2DH et 1D (fig. 2.1) et l'adaptation du modèle 2D à des frontières océaniques ouvertes. Un modèle de transport pour un scalaire passif sans prise en compte de la chute des particules a également été ajouté. Ces modèles ont permis de reconstituer le champ de courants et le champ de MES à l'embouchure pour les deux épisodes, l'un en période d'étiage (mai 86), l'autre à la suite d'une crue (déc. 87) (fig. 2.2). Les résultats ont mis en évidence les tendances générales d'un rejet de polluant à l'embouchure en bonne adéquation avec les structures turbides apparaissant sur les images SPOT (fig. 2.3). Ces résultats ont été présentés et discutés en détail dans un compte-rendu de congrès [voir annexe], ils n'ont pas fait l'objet d'un article dans un journal.

Il s'agissait là d'un travail pionnier dans le domaine, d'une part parce que les applications de l'imagerie spatiale en océanographie côtière n'étaient que balbutiantes à échelle locale, d'autre part pour l'idée même de Bernard Caussade, de rapprocher images et modèles malgré leurs imperfections et les temps de calcul nécessaires sans rapport avec les performances des matériels actuels, dès la fin des années 80.

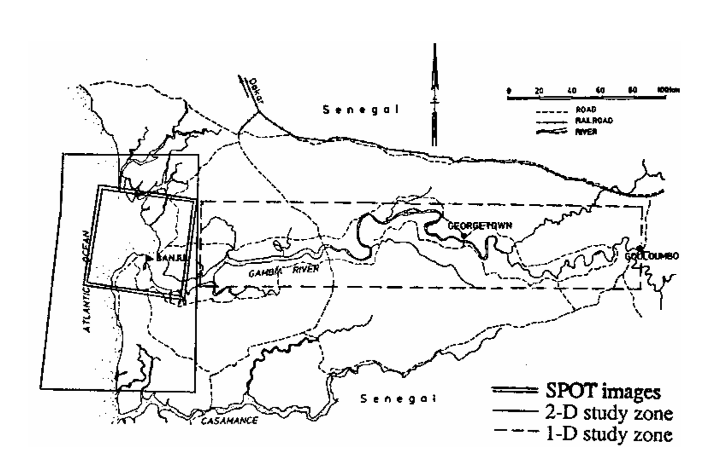
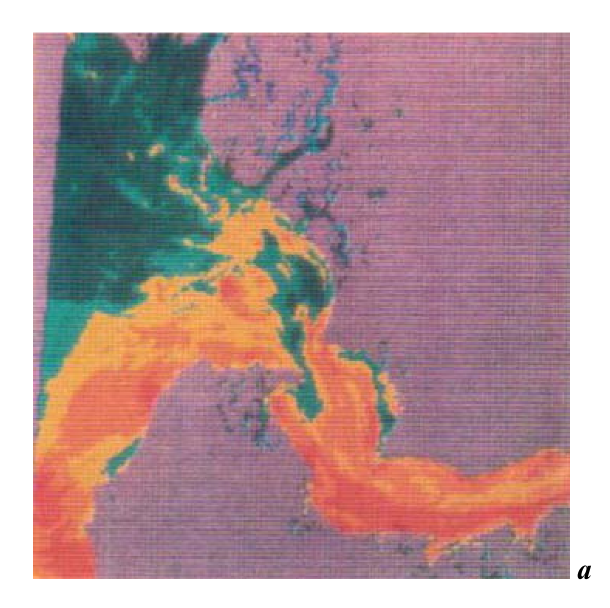


Fig. 2.1 *Domaines de modélisation 1D et 2D et couverture SPOT à l'embouchure du fleuve Gambie*

Fig. 2.2 *Analyse des courants instantanés simulés pour le 23-12-1987*



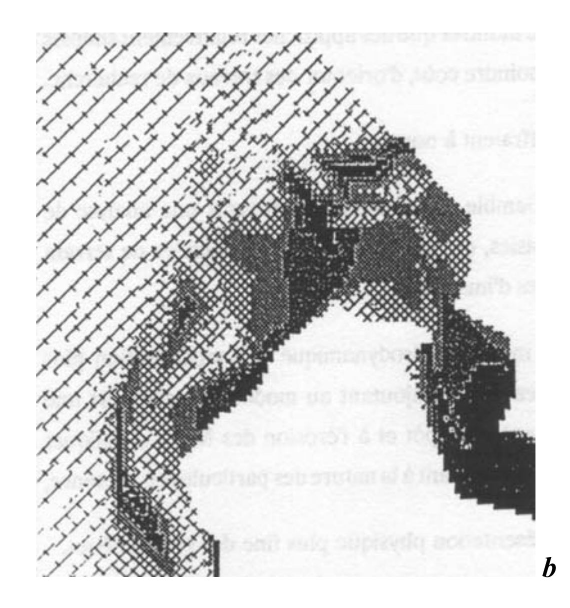


Fig. 2.3 *Champ de concentration en Matières En Suspension à l'embouchure du fleuve Gambie le 23-12-1987. (a). à partir de données Spot [Martel 1990]. (b). simulation numérique d'un traceur passif.*

Prolongements & Applications

A la suite de ces travaux, ma connaissance du code MEFAME m'a conduit à co-encadrer deux étudiants en stage de DEA qui ont utilisé ce code : Natacha Papalopoulou pour la modélisation hydro-écologique de la baie de Thessalonique (co-encadrement avec Lucien Masbernat, IMFT) et Mohamed Aoun Nabli sur la modélisation de la lagune nord de Tunis (co-encadrement avec Mahmoud Moussa de l'ENIT et avec L. Masbernat).

Au cours de l'étude de l'embouchure de la Gambie, la nécessité de disposer d'un modèle tridimensionnel de circulation et de transport est clairement apparue pour traiter de situations réellement 3D (*e.g.* upwellings), mieux estimer les contraintes de cisaillement au fond, et pouvoir extraire les résultats de simulations sur une couche de surface pour une comparaison plus propice avec les champs de turbidité issus de données spatiales. Sur la base d'un code 3D résolvant les équations de Navier-Stokes en milieu confiné par la méthode des volumes finis, j'ai ensuite mis au point à l'IMFT deux modules pour adapter le code à nos besoins, l'un permettant de prendre en

compte une surface libre et de calculer son évolution, l'autre concernant le transport en suspension de sédiments non cohésifs (sables).

Modélisation 3D d'écoulement autour d'un épi [Ouillon et Dartus 1997]

Au code PHOENICS (version 1.6.2) résolvant les équations 3D de Navier-Stokes en milieu confiné, nous avons intégré un premier module pour prendre en compte l'évolution spatio-temporelle d'une surface libre. La déformation de la surface libre est suivie à l'aide d'une méthode dite « de porosité ». Elle consiste à multiplier les volumes et les surfaces des mailles de calcul par le taux de présence local de l'eau dans chaque maille (fig. 2.4). La hauteur d'eau (et donc le taux de présence dans la maille de surface) est calculée à partir de l'équation de continuité intégrée sur la colonne d'eau.

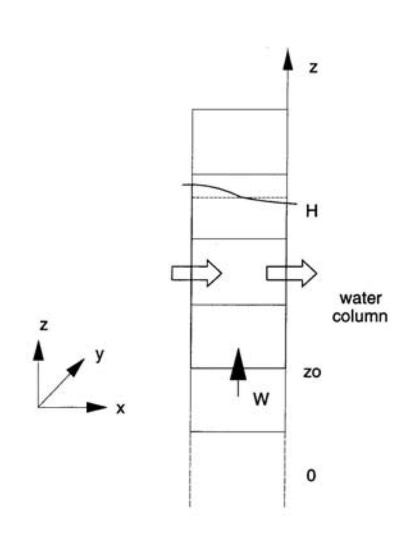


***Fig. 2.4** Calcul de l'élévation de surface*

La fermeture turbulente repose sur un modèle (k, ε), avec une condition spécifique à la surface libre proposée par Celik et Rodi (1984). La méthode de résolution s'appuie sur l'algorithme SIMPLE [Patankar 1980 ; Patankar et Spalding 1972] modifié par Zhou et Zhang (1989). L'algorithme résultant, baptisé HH-SIMPLE, présente l'avantage de ne supposer la répartition de pression hydrostatique qu'en maille de surface.

Ce modèle a été testé sur des données issues d'expériences en canal simulant l'écoulement autour d'un épi [Holtz 1991]. La figure 2.5 présente la configuration de l'expérience, la figure 2.6 les résultats concernant la hauteur d'eau. La précision dans la restitution des courbes de remous s'est avérée excellente, l'écart maximum entre hauteurs mesurée et calculée étant de 0.5 %. Nous avons également comparé ces résultats prenant en compte une surface libre et les calculs effectués sous l'hypothèse d'un toit rigide. Par exemple, le point de recollement de la zone de recirculation qui apparaît derrière l'épi se situe à une distance adimensionnalisée de 10.7 lorsque l'on prend en compte une surface libre. Elle n'est plus que de 8.0 avec l'hypothèse du toit rigide, tandis qu'elle a été mesurée à 11.5 (fig. 2.7).

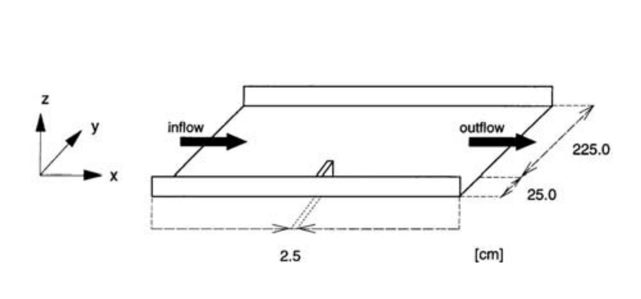


***Fig. 2.5** Configuration du canal à épi [Holtz 1991]*

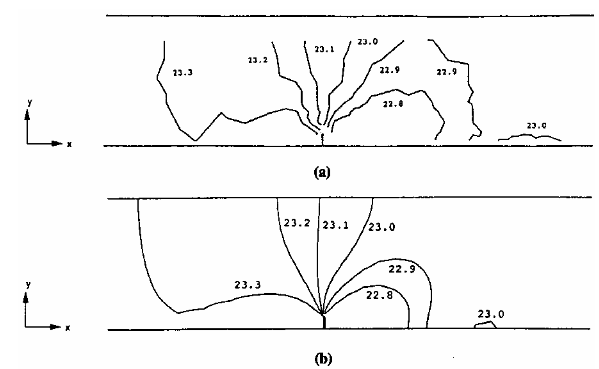
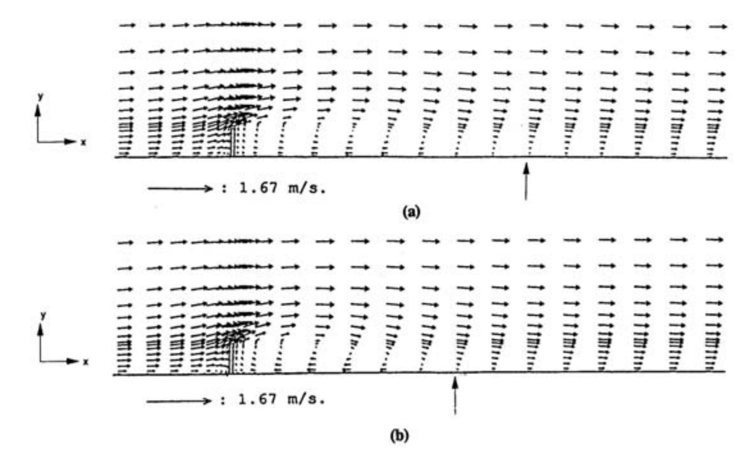


***Fig. 2.6** Hauteurs d'eau dans le canal (en cm) pour le régime stationnaire considéré. (a) mesures [Holtz 1991]. (b) simulation numérique.*



D'autres résultats ont été analysés à la suite de nos calculs, par comparaison avec les mesures. Ils concernent le champ de vitesses, le niveau moyen de turbulence, le champ de contraintes de cisaillement au fond, les zones potentielles d'érosion et de dépôt pour un fond constitué de sable calibré [cf annexe].

Fig. 2.7 *Champ de vitesse de surface calculé et localisation du point de recollement. (a) avec surface libre. (b) avec toit rigide.*

Citations de l'article par : Roig (1998), Jia et Wang (1999), Blumberg *et al.* (1999), Molinas et Hafez (2000), Bradbrook *et al.* (2000), Bombardelli *et al.* (2001), Bradbrook *et al.* (2001), Namin *et al.* (2001), Hankin *et al.* (2002), Sukhodolov *et al.* (2002), Biron *et al.* (2002), Yossef et Klaassen (2002), Sukhodolov *et al.* (2004).

Modélisation 2DV du transport de sédiments non cohésifs [Ouillon et Le Guennec 1996]

Un second module a été développé pour simuler le transport 3D de Matières En Suspension non cohésives. Nous avons introduit, dans une équation de type advection-diffusion d'un scalaire, les termes de glissement d'une population de particules par rapport aux mouvements du fluide et les termes source et puits résultant des processus d'échange de matière entre l'écoulement et le lit, en zone de fond.

Ce modèle a été testé sur trois configurations correspondant à des expérience en canal : une configuration à l'équilibre [Milisic 1976], un écoulement avec érosion d'un lit affouillable sans charge initiale [van Rijn 1986] et un écoulement en situation de dépôt net [Jobson et Sayre 1970]. Le cas d'un écoulement à l'équilibre et celui d'une situation de dépôt net sont illustrés respectivement en figures 2.8 et 2.9.

Les analyses de sensibilité du modèle ont porté (1) sur la représentation du flux turbulent de particules, la diffusivité Γ_c étant exprimée à partir de la viscosité turbulente ν_t et du nombre de Schmidt σ_c, et (2) sur la condition limite au fond.

Le modèle (k, ε) a été employé pour calculer ν_t. Pour les sables de diamètre 130 μm, la comparaison des profils mesurés et simulés à l'équilibre s'est avérée optimale pour σ_c=0.7, en accord avec les recommandations de Launder (1978) pour les écoulements turbulents libres.

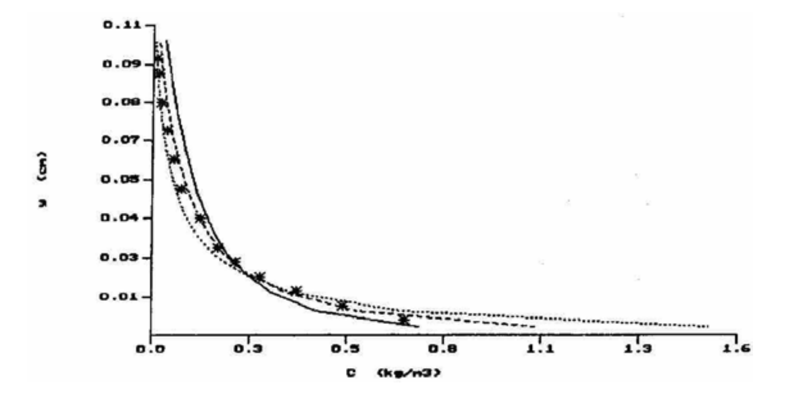
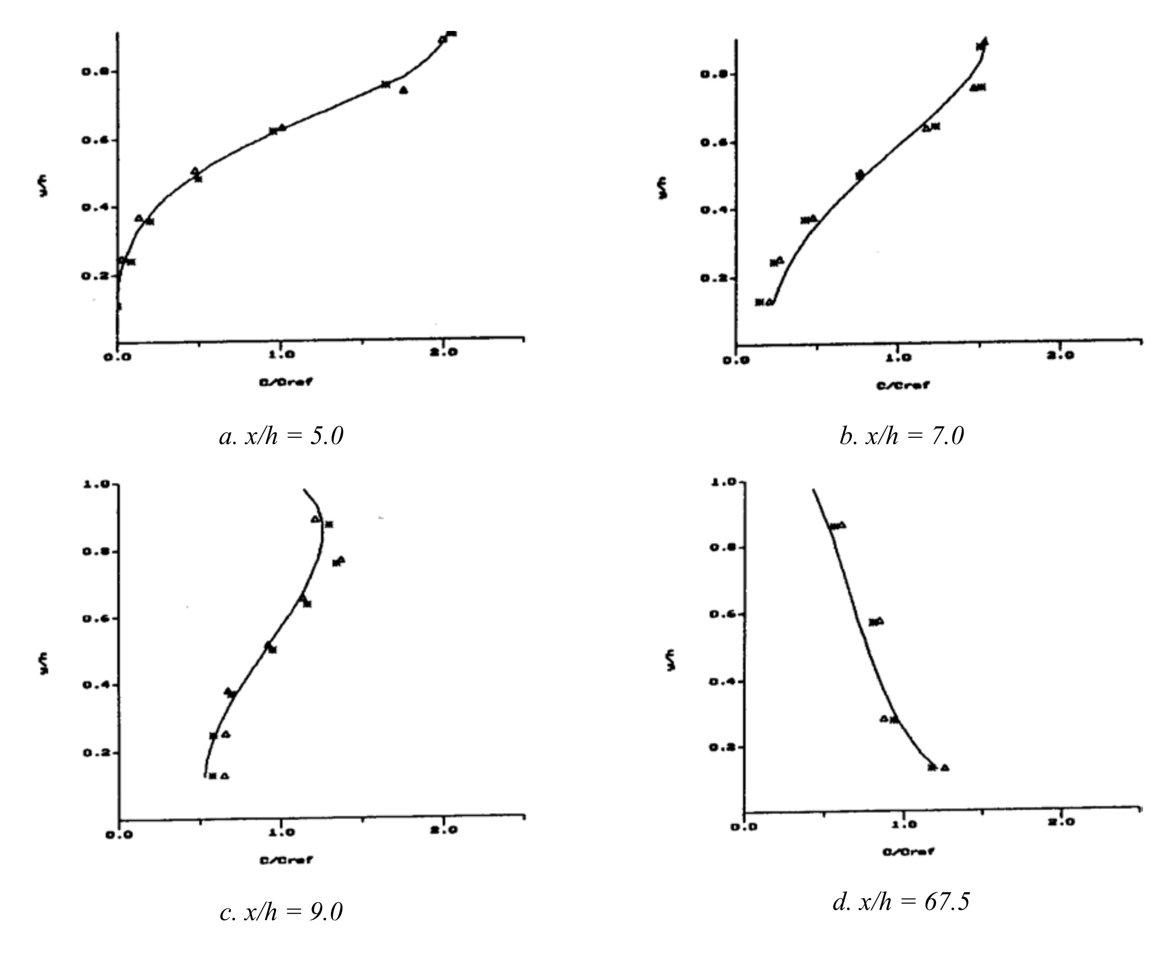


Fig. 2.8 *Profil de concentration en MES dans un écoulement à l'équilibre : * points expérimentaux [Milisic 1976] et simulations (analyse de sensibilité au nombre de Schmidt)*

Nous avons également illustré la disparité des formules disponibles dans la littérature pour exprimer les conditions de fond pour du sable. Le flux net de particules depuis le lit (flux > 0 pour une érosion nette) fait intervenir, suivant une proposition de Celik et Rodi (1988), le flux de dépôt gravitaire et le flux d'érosion supposé égal à celui qu'il y a en régime à l'équilibre calculé sur la base de considérations énergétiques. Nous avons adopté la formulation de van Rijn (1986) pour la concentration à l'équilibre proche du fond, formule qui fait intervenir des paramètres hydrodynamiques (ex : contrainte de cisaillement τ) et des paramètres sédimentologiques. La simulation d'un transfert hors équilibre avec érosion nette montre que la détermination de la contrainte de cisaillement "disponible pour les grains" τ' (c'est-à-dire la force au fond utilisée pour l'échange de particules entre le lit et l'écoulement) est l'étape la plus sensible du calcul. Sur l'exemple traité, la formule de van Rijn (1986) conduit à une estimation de τ' 3 fois supérieure à celle de Celik et Rodi (1991) qui induit un écart d'un facteur 7 entre les estimations de concentration à l'équilibre.



a. x/h = 5.0 *b. x/h = 7.0*

c. x/h = 9.0 *d. x/h = 67.5*

Fig. 2.9 *Développement des profils de concentration de sable fin (d_{50}=0.123 mm) en canal en situation de dépôt net. Les courbes correspondent aux simulations, les symboles aux résultats expérimentaux de Jobson et Sayre (1970).*

Citations : Ashley *et al.* (1999), Fang et Wang (2000), Cao et Carling (2002). *Remarque : l'article Ouillon et Le Guennec (1996) a été publié en français dans une revue anglo-saxonne.*

Prolongements & Applications

Mon apprentissage du code PHOENICS avec D. Dartus et les développements que j'ai apportés ont eu d'autres implications que les seuls travaux de recherche conduits dans ma thèse, en enseignement à l'ENSEEIHT puis en recherche à l'IMFT. En 1991, alors que j'étais moniteur à l'ENSEEIHT, nous avons mis en place avec Dartus un cours de code de calcul industriel en mécanique des fluides, dans l'objectif d'apprendre aux étudiants à utiliser un outil alors en plein essor dans l'industrie et à porter une analyse critique sur les résultats des simulations. Ce cours a été illustré par un polycopié

référencé à l'ENSEEIHT [Dartus et Ouillon 1991] et a été "l'un des ferments qui a permis la mise en place de l'option Mécanique des Fluides Numérique en troisième année du Département Hydraulique-Mécanique des Fluides" de l'ENSEEIHT [Dartus 1998]. La seconde implication a concerné la formation, avec Dartus, de plusieurs étudiants en stage de DEA à l'IMFT sur l'utilisation du code PHOENICS. Plusieurs parmi eux ont ensuite développé leurs modules ou adapté le code à leur besoin dans le cadre d'une thèse : Moacyr Araujo Filho (1996), Christine Dargent (1996) et Philippe Maurel (1997). Enfin, les outils numériques mis au point à l'époque pour la simulation du transport de MES ont été utilisés par la suite dans les travaux de H. Zouhair (Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis) sur la formation et l'entraînement des dépôts au voisinage des prises d'eau dans les barrages, et de E. Lucas-Aiguier (Ecole Nationale des Ponts et Chaussées) sur la modélisation du transport en suspension des solides de rejets urbains par temps de pluie dans un écoulement à surface libre.

2.2 Panaches fluviaux

Les panaches fluviaux présentent des interfaces de densité parfois très marquées, que ce soit à la limite de leur extension spatiale -on parle alors de « front »- ou à la limite de leur développement vertical -et l'on parle de stratification-. Ces zones ont une importance capitale pour le milieu vivant qui s'y développe en abondance. Le fonctionnement physique d'un panache n'a été décrit que récemment [Garvine 1974, 1977; Chao et Boicourt 1986; Chao 1987, 1988a, 1988b; O'Donnell 1990]. Globalement et succinctement, en absence de vent, les eaux fluviales plus légères que les eaux marines décrivent après l'embouchure un tourbillon de surface anticylonique dans l'hémisphère nord qui se prolonge en un courant côtier. La transition entre le tourbillon anticyclonique et le courant côtier est abrupte et impose une trajectoire cyclonique des masses d'eau associée à des mouvements de downwelling (cf fig. 2.10). La forme du panache et son extension spatiale est déterminée par le nombre de Froude (F_r = vitesse de l'écoulement / célérité des ondes baroclines) et contrainte par le vent et la circulation générale. Leur simulation numérique constitue encore un test pour le numéricien étant données les difficultés de représenter correctement les interfaces et leur dynamique (avancée d'un front), ainsi que la transition d'un régime hydrodynamique sur-critique ($F_r>1$) à un régime sous-critique ($F_r<1$) qu'un panache connaît fréquemment en milieu microtidal. Les défis posés aux modélisateurs physiciens concernent essentiellement les schémas numériques et la modélisation de la turbulence. Par exemple, Oey et Mellor (1993) ont montré qu'un modèle de turbulence adapté permettait de reproduire des méandres dans le courant côtier et le détachement de "poches d'eau" peu salées.

Philippe Fraunié est arrivé au LSEET en 1993 muni d'un code tridimensionnel (OCKE3D) en volumes finis et coordonnées cartésiennes dérivé d'un code anglais et adapté à la simulation des écoulements en zones côtières sous sa direction et par plusieurs thésards [Marcer 1991, Verdier-Bonnet 1996]. Le code à surface libre OCKE3D résout les équations 3D d'écoulement à surface libre et les équations de transport de la salinité et de particules en suspension décantantes, en régime stationnaire ou instationnaire.

Le LSEET a été successivement engagés dans le PNOC puis dans les deux programmes européens MEDDELT (94-96), sur le panache du Rhône, et FANS (96-99), sur le panache de l'Ebre. Chacun des programmes a donné lieu à une thèse en modélisation numérique sur la base du code OCKE3D. P. Fraunié a dirigé les thèses de S. Arnoux-Chiavassa sur le Rhône, co-encadrée par V. Rey, et de N. Durand sur l'Ebre, que j'ai co-encadrée. Avant que le programme FANS ne démarre, N. Durand a travaillé pendant plus d'un an avec S. Arnoux à la modélisation du panache du Rhône.

<u>Modélisation hydrodynamique du panache du Rhône</u>

La modélisation 3D du panache du Rhône a débuté au LSEET en 1994 par les premières applications du code OCKE3D par S. Arnoux-Chiavassa, rejointe par N. Durand en stage de DEA en 1995. Elles ont tout d'abord défini et effectué les simulations pour les forçages de novembre 94 correspondant au mois de mesures (radar VHF + bateau + SPOT) réalisé par le LSEET [Arnoux *et al.* 1995a; 1995b]. La présentation de l'étude intégrée du panache du Rhône qui inclue modèle,

mesures et images est renvoyée au chapitre 4. Fin 1996 N. Durand s'est tournée vers la modélisation du panache de l'Ebre lors du démarrage du programme FANS.

Les premières applications d'OCKE3D ayant montré les limites du modèle à reproduire correctement les fronts, le travail de S. Arnoux a été orienté vers la recherche et l'implémentation d'un schéma numérique adapté. Le principal développement de sa thèse a été l'introduction dans le code d'un schéma numérique de type TVD (Total Variation Diminishing) adapté à la résolution des équations en milieux à forts gradients et qui limite sensiblement la diffusion numérique par rapport aux schémas numériques classiques de type "upwind" [Arnoux-Chiavassa *et al.* 2003]. Le schéma SMART [Sharp and Monotonic Algorithm for Realistic Transport - Gaskell et Lau 1988] introduit par Arnoux-Chiavassa limite l'utilisation du schéma QUICK [Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics – Leonard 1979] aux régions où la variation des composantes de vitesse est monotone.

Ma participation aux travaux d'Arnoux-Chiavassa a été ponctuelle, relative à une revue de schémas non diffusifs introduits dans certains codes industriels dont le code PHOENICS, à une participation à la campagne MODEPAR (radar + bateau, Nov. 94), à une formation succincte concernant la signification et l'utilisation des mesures satellitales visibles du panache fluvial et à la fourniture des données spatiales pour alimenter et valider le modèle (cf § 3.2). Les travaux réalisés peuvent être consultés dans Arnoux-Chiavassa (1998) et Arnoux-Chiavassa *et al.* (1999, 2000, 2003).

Dans le prolongement de ces participations, j'ai ensuite co-encadré avec P. Fraunié les DEA d'A. Paulmier (1999) puis de G. Reffray (2000) respectivement sur la modélisation du transport particulaire et sur la modélisation haute précision du panache du Rhône, toujours sur la base d'OCKE3D. Dans une première partie, G. Reffray a comparé plusieurs schémas numériques limiteurs de flux sur deux cas-tests, le transport d'un profil en marche d'escalier et celui d'un pic de concentration dans un fluide tournant, en prolongement des travaux d'Arnoux-Chiavassa. Dans une seconde partie, Reffray a poursuivi la simulation et l'analyse du panache du Rhône dans un cas sans vent et pour la situation réelle du 29 mars 1999. Le cas d'un débit constant du Rhône à 2500 m^3/s en l'absence de vent montre clairement la circulation anticyclonique de surface se prolongeant en courant côtier (fig. 2.10*a* – voir aussi fig. 3.5). La fig 2.10*b* montre qu'un courant de retour parallèle à la côte et dirigé vers l'embouchure est observé en zone littorale à l'ouest de l'embouchure. Nous pensons que la divergence des courants littoraux illustre la morphologie du delta à l'ouest de l'embouchure : l'érosion doit être maximale dans la zone de divergence des courants littoraux et les courants parallèles à la côte alimentent vers l'ouest la pointe de Beauduc et vers l'est la pointe du delta, dessinant ainsi la courbe du trait de côte [cf fig. 4.1]. A la suite de son stage de DEA, Reffray a poursuivi ses travaux en thèse sur le code SYMPHONIE [Estournel *et al.* 1997; Marsaleix *et al.* 1998] dans le cadre d'un partenariat entre le LSEET et le Laboratoire d'Aérologie (Toulouse).

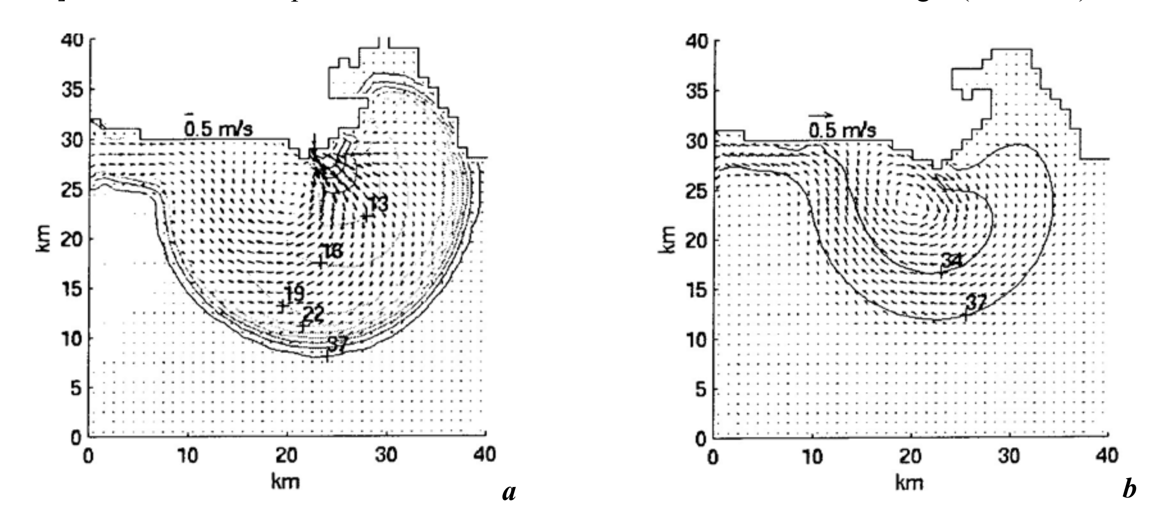


Fig. 2.10 *Champ de vitesse horizontale et isohalines. (a) en surface. (b) à 3 m de profondeur. [Reffray 2000]*

Modélisation hydrodynamique du panache de l'Ebre [Durand 2000, Durand *et al.* 2002]

Le programme FANS (Fluxes Accross Narrow Shelves) financé par MAST-III était dédié au domaine côtier soumis à l'influence de l'Ebre. Cette région, caractérisée par un élargissement du plateau continental, a subi au cours du XXème siècle une diminution drastique des apports liquides et solides par le fleuve consécutive aux aménagements du bassin versant. L'appauvrissement constaté de la frange côtière s'est accompagné d'une fragilisation du delta. L'un des objectifs du programme FANS était de dresser un bilan des échanges au large du delta de l'Ebre. La participation du LSEET consistait à déterminer dans quelles circonstances le fleuve est capable de générer des flux particulaires significatifs vers le domaine hauturier et d'en évaluer l'occurrence.

Le LSEET a participé à deux campagnes de 12 jours dans le panache de l'Ebre sur le "Téthys II" en nov. 96 et en juillet 97 (cf p.3). A cette ocasion, nous avons effectué en grand nombre des profils CTD (profils de salinité et température), des prélèvements d'eau (pour filtration et pesée) et des mesures optiques pour préparer l'inversion de données satellitales en terme de concentration en MES. Certaines journées étaient dédiées, suivant une méthode mise au point par Jean-Jacques Naudin (CNRS - L.O. Banyuls), au suivi pseudo-lagrangien d'une bouée dérivante pour décrire les processus de mélange dans une couche de surface d'épaisseur 5 à 10 m, alors que le panache a une profondeur de l'ordre de 2 m [méthode présentée dans Naudin *et al.* 1997]. Pour utiliser ces suivis dans l'étude physique du panache, N. Durand a ajouté au code un module de suivi lagrangien (calcul pas à pas de la trajectoire d'un traceur localisé). Une illustration des mesures et simulations lagrangiennes est présentée en figure 2.11 (trajectoire) et 2.12 (profils de salinité sur 6 stations).

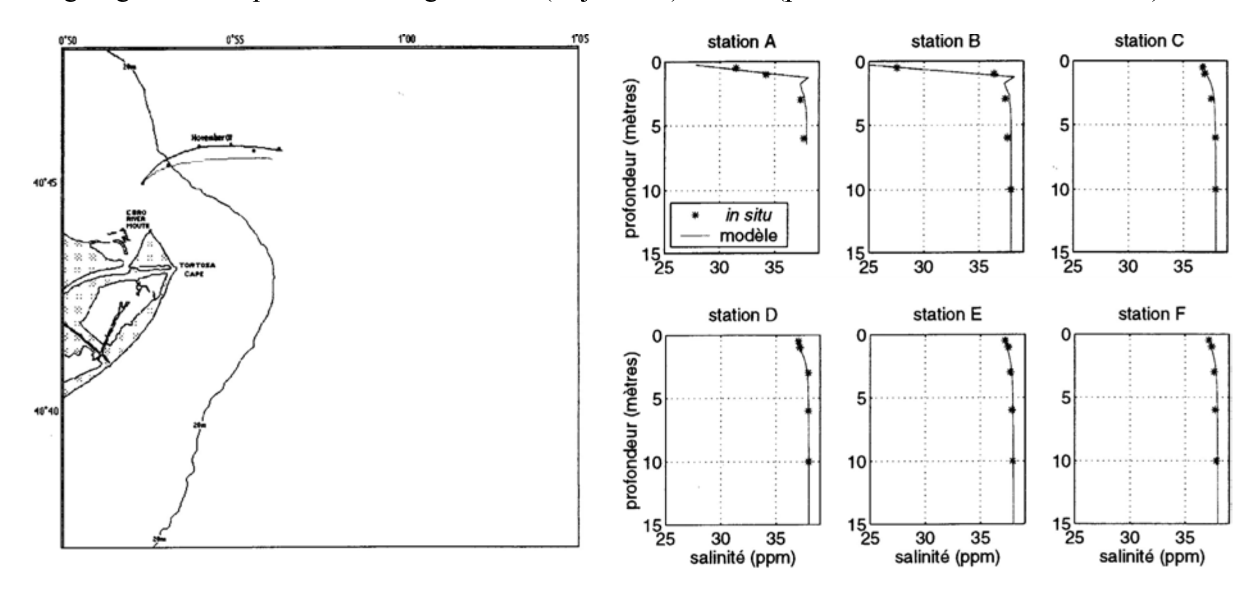


Fig. 2.11 *Trajectoire suivie par une bouée dérivante le 7/11/96 : mesures (gras + symboles) et simulation (trait fin)*

Fig. 2.12 *Comparaison de profils de salinité mesurés et simulés le long de la trajectoire du 7/11/96*

Sur le plan numérique, N. Durand a effectué une discrétisation complète du code au second ordre en adoptant les schémas du Princeton Ocean Model (POM) [Blumberg et Mellor 1987]. Elle a également défini une stratégie de modélisation faisant intervenir un maillage à taille variable dans un domaine "physique" (i.e. sur lequel les résultats du modèle sont réalistes), emboîté dans un domaine de calcul "numérique" plus vaste qui permet au champ hydrodynamique de s'organiser en fonction des conditions aux limites en mer ouverte et d'un forçage du vent imposé progressivement. Cette stratégie limite à la fois les problèmes numériques, qui avaient engendré des divergences de calcul lors de premiers tests, et les temps de calcul.

Les applications du modèle à l'embouchure de l'Ebre, qui ont fait appel aux données de télédétection à des fins de calibration et validation, sont présentées au chapitre 4.

2.3 Lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie

Les adaptations et applications de modèles numériques d'hydrodynamique et de transport particulaire à des lagons sont rares. Les travaux publiés en hydrodynamique sont basés sur des modèles bidimensionnels [Frith et Mason 1986, Kraines *et al.* 1998] et sur des modèles tridimensionnels pour des zones d'extension réduite [Tartinville *et al.* 1997]. Les modèles de transport de MES sont couramment appliqués en rivière, sur les plateaux continentaux et en zones côtières pour les particules non-cohésives [*e.g.* Chapalain et Thais 2000] et en estuaires turbides pour les particules cohésives [*e.g.* Brenon et Le Hir 1999]. Mais, malgré des spécificités géomorphologiques et des conditions environnementales particulières sur lesquelles nous reviendrons au chapitre 5, leurs adaptations à des milieux lagonaires sont inexistantes ou confidentielles.

L'hydrodynamique du lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie fait l'objet d'études depuis les années 70. Au départ descriptives [Jarrige *et al.* 1975], ces études ont fait l'objet de séries temporelles de mesures de courant et de marée sous l'égide de Pascal Douillet à la fin des années 80 [Douillet *et al.* 1989, 1990]. Au début des années 90, Douillet a travaillé pendant 5 ans avec l'équipe de modélisation numérique de la DEL/AO à l'Ifremer-Brest. A la suite de cette expérience, il a mis en place un modèle 2D de marée sur le lagon sud-ouest [Douillet 1998] puis un modèle hydrodynamique 3D en différences finies et aux coordonnées-σ en collaboration avec P. Lazure. Le modèle 3D implanté sur le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie dérive du code MARS de l'Ifremer. Les modèles 2D et 3D du lagon ont été validés à partir de nombreuses séries temporelles de mesure de courant et de marée. Une version récente du code MARS3D fournie par la DEL/AO de l'Ifremer fin 2003 sera officiellement employée à partir de 2004 sur le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie sous l'égide de Douillet.

Ma collaboration avec P. Douillet a démarré par la mise en place d'un modèle de transport de particules cohésives (vases) en 2000, à l'occasion du stage de DEA d'Emmanuel Cordier. Ce premier travail a donné lieu à une communication puis à une publication dans *Coral Reefs* [Douillet *et al.* 2001]. Nous avons poursuivi le développement et les tests du modèle de transport de vases et avons également implanté un modèle de transport de sables en 2001, à l'occasion du stage de DEA de Bastien Bouron-Morin.

Dès les premières applications des modèles de transport, nous avons pris conscience de leurs limites d'application dans les zones où l'influence des vagues sur le dépôt et l'érosion peut être significative. Pour étendre l'application du modèle aux zones à petits fonds, nous avons alors entrepris de modéliser le champ de vagues dans le lagon sud-ouest, en collaboration avec Loys Schmied du LSEET. L'implantation d'un code de diffusion publique sur le lagon (code WAVEWATCH III) a démarré en 2002, période à laquelle nous avons également démarré des séries de mesure de vagues dans le lagon. La connexion des modèles de courant, de vagues et de transport est en cours. Ainsi, nos activités en modélisation s'organisent suivant le schéma présenté en figure 2.13.

Ce schéma fait apparaître par anticipation les développements prévus à court terme qui concernent l'évolution du modèle de turbulence, d'une part, et d'autre part la modélisation atmosphérique régionale. Le modèle atmosphérique donnera accès à la distribution de vent sur le lagon, alors qu'à présent les modèles de circulation et de vagues sont uniformément forcés par le vent mesuré en un point sur un ilôt central du lagon. Ces perspectives sont présentées plus en détail dans le chapitre 5. Les paragraphes suivants résument les travaux de modélisation entrepris depuis 2000 sur le lagon calédonien et présentent quelques résultats à titre d'illustration.

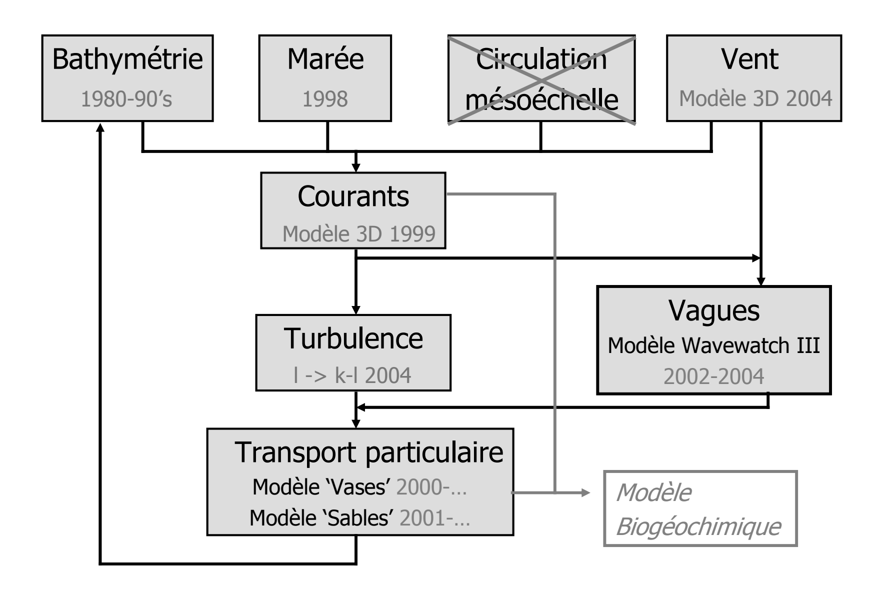


Fig. 2.13 *Organisation des activités de modélisation physique au sein de l'UR CAMELIA. La circulation mésoéchelle n'a pas d'influence sur la circulation dans le lagon sud-ouest, qui n'est ouvert à l'extérieur qu'au niveau des passes.*

Modélisation 3D du transport de sédiments fins [Douillet *et al.* 2001]

Les fonds du lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie sont très hétérogènes. Vases et sable en proportion variable constituent les fonds meubles et de très nombreux autres types de substrats sont présents : coraux, herbiers, algueraies, maërl, fonds durs. Par temps calme, l'essentiel de la turbidité des eaux est dû à la remise en suspension des particules fines (argile, limon) qui constituent la couche sédimentaire superficielle. Ainsi, pour modéliser le transport particulaire dans le lagon, le maillon indispensable complétant un modèle hydrodynamique est un modèle de transport de vases. Nous avons tout d'abord implanté un modèle générique de transport, les lois de dépôt et d'érosion pour les sédiments cohésifs provenant respectivement des formulations de Krone (1962) et Parthéniades (1965), et avons effectué une première estimation globale des principaux paramètres qu'il convient d'ajuster dans ce type de modèle. Les équations résolues par le modèle sont présentées *in extenso* dans l'article joint en annexe.

Le modèle est programmé pour résoudre autant d'équations de transport advectif-diffusif qu'il y a de classes de tailles de particules significatives. En 2000, nous ne disposions d'aucune donnée granulométrique concernant les particules en suspension, en revanche plusieurs analyses granulométriques avaient été effectuées sur des sédiments superficiels par tamisages successifs [cartes sédimentologiques réalisées par F. Dugas et J.P. Debenay de 1978 à 1982; Debenay 1987; Chardy *et al.* 1988, complétées par les mesures de Chevillon dans les années 90] ou à l'aide d'un granulomètre laser dans la baie de Dumbéa [stage d'O'Callaghan en 1999 sous la direction de Piers Larcombe, Townsville]. Les courbes granulométriques du sédiment superficiel indiquent la présence quasi-générale d'une population de particules de taille comprise entre 5 et 9 µm, centrée sur 7 µm. Il s'agit de particules individuelles, la première classe d'agrégats ou de particules de taille supérieure variant d'un site à un autre dans le lagon autour de 30 à 40 µm. Nous avons donc appliqué dans un premier temps le modèle au transport d'une classe de particules de diamètre représentatif 7 µm. Notre choix s'est porté sur les particules les plus fines parce qu'elles sont majoritairement responsable de la turbidité des eaux [Larcombe *et al.* 1995; Wass *et al.* 1997; Bunt *et al.* 1999], ce qui permet notamment d'utiliser les mesures de turbidité pour calibration et/ou validation du modèle. La vitesse de chute des particules dans le modèle est calculée à partir de leur diamètre et de leur densité par la loi de Stokes.

La variable-clé dans les processus de dépôt et d'érosion est le cisaillement au voisinage du fond induit par les courants et, le cas échéant, par les vagues. Pour chaque classe de particules, les modèles font intervenir une contrainte-seuil d'érosion notée τ_{ce}, au-delà de laquelle se produit l'érosion des fonds, et une contrainte-seuil de dépôt τ_{cd}, en-deça de laquelle se produit un dépôt. Pour notre part, nous avons supposé l'égalité des contrainte-seuils de dépôt et d'érosion. Le troisième paramètre majeur du modèle est le "taux d'érosion" noté k_e qui, multiplié par l'excès de cisaillement adimensionnel, permet d'estimer le flux particulaire [eq. 8 dans Douillet *et al.* 2001].

Une première calibration globale de ces paramètres a été réalisée dans le cas d'un forçage par la marée et un alizé moyen typique de manière à ce que (1) la répartition des dépôts calculés par le modèle soit cohérente avec la distribution du pourcentage de vase dans le sédiment superficiel et (2) le bilan sédimentaire soit globalement à l'équilibre (érosion=dépôt) pour l'ensemble du domaine et pour un cycle de marée.

Pour vérifier le critère (1), nous avons analysé la distribution de contrainte moyenne pendant un cycle de marée en regard de la distribution du taux de vases dans le sédiment superficiel. Sur les zones où le pourcentage de vase est inférieur à 10 %, signalant ainsi des zones préférentielles d'érosion pour les particules fines, le cisaillement moyen est supérieur à 0.01 N/m^2. D'autre part, sur les zones préférentielles de dépôt (pourcentage de vase supérieur à 30 %), le cisaillement moyen est inférieur à 0.02 N/m^2. L'estimation de la contrainte-seuil sur l'ensemble du domaine nous a conduit à une valeur intermédiaire de 0.017 N/m^2 (cf fig. 2.14). Cette valeur, bien qu'assez faible en regard des seuils indiqués dans la littérature, est cependant cohérente avec la gamme des seuils d'érosion présentée par Thomsen et Gust (2000) pour des limons. Elle est plus cohérente avec les valeurs de la littérature relatives aux marges continentales qu'avec les seuils d'érosion donnés pour des estuaires ou des zones côtières, généralement plus grands [Le Normant 1995, Schaaf 1999].

Alors que le premier critère a été déterminé à partir du seul modèle hydrodynamique, la simulation du transport a permis une première estimation du taux d'érosion de la classe de particules considérée. Nous avons dans un premier temps supposé que ce taux était proportionnel à la fraction locale de vases dans le sédiment superficiel pour prendre en compte la disponibilité relative de ces particules. Le facteur de proportionnalité, noté ke_c, a été déterminé de manière à ce que le dépôt global sur le domaine compense l'érosion durant un cycle de marée.

Les simulations conduites après cette calibration globale du modèle mettent en évidence des zones préférentielles de dépôt en situation typique (fig. 2.15) très cohérentes avec les données sédimentologiques (2.16). Elles nous ont permis également de montrer qu'en situation d'alizé moyen la marée était le moteur principal favorisant l'érosion, le mélange vertical et le dépôt sur des fonds supérieurs à 20 m, et que vent et marée combinaient leurs influences sur des zones moins profondes.

Après cette première calibration du modèle sur cas d'école, les simulations ont été comparées à des mesures de terrain et à des champs de turbidité issus de données satellitales [Ouillon *et al.* 2004]. Ce travail, qui résulte d'une intégration modèle-mesure-télédétection, est présenté dans le chapitre 4.

Citations de Douillet et al (2001) : Grenz *et al.* (2003), Doxaran *et al.* (2003), Bouvet *et al.* (2003), Pinazo *et al.* (sous presse)

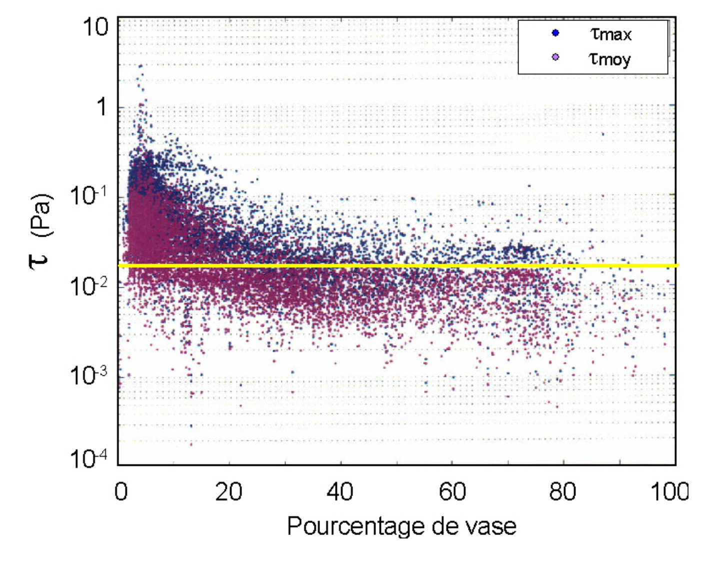


Fig. 2.14 *Contrainte moyenne et contrainte maximale surl'ensemble des points de calcul pendant un cycle de marée, en situation d'alizé moyen (8 m/s), en fonction du pourcentage de vase dans le sédiment superficiel.*
La valeur seuil retenue, 0.017 Pa, est indiquée d'un trait horizontal.

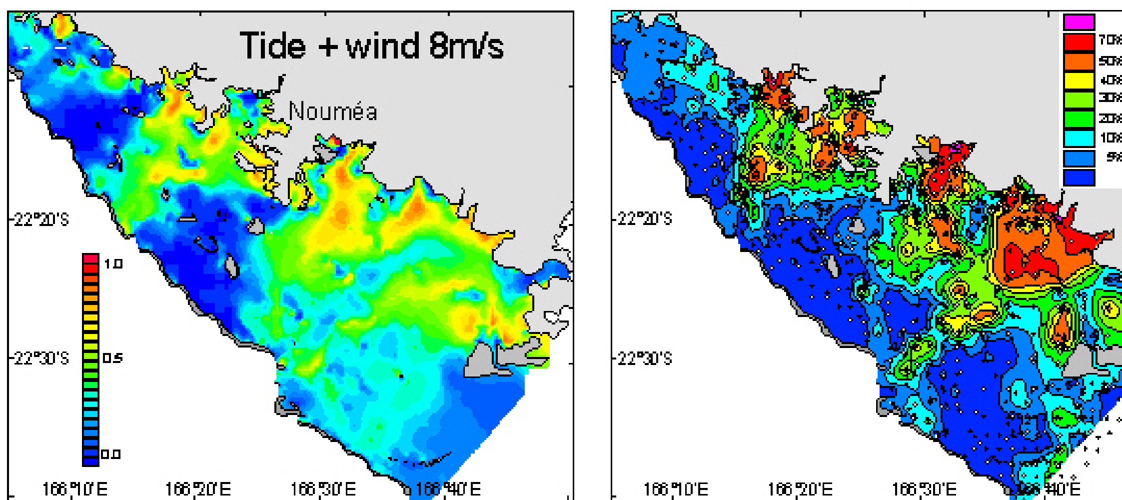


Fig. 2.15 *Flux de dépôt de vase cumulé sur un cycle de marée sous l'effet marée + alizé (en g/m^2/cycle)*

Fig. 2.16 *Répartition de la teneur en vase des sédiments (d'après Debenay 1987, Chardy et al. 1988)*

<u>Modélisation 3D du transport de sédiments non cohésifs [non publié]</u>

Un modèle de transport advectif-diffusif de sédiments non cohésifs (sables) a été implanté et testé lors du stage de DEA de B. Bouron-Morin en 2001, co-encadré avec P. Douillet. L'équation générale résolue est l'équation d'advection-diffusion résolue également pour le transport de vases. Les différences entre les deux modèles concernent l'expression de la vitesse de chute et surtout les conditions aux limites en zone de fond. Plusieurs expressions existent pour exprimer la vitesse de chute des grains de sable à partir de leur diamètre-équivalent (le diamètre qu'ils auraient s'ils étaient sphériques et de même poids). Nous avons testé l'expression de Gibbs et al. (1971). Les conditions aux limites au fond ont été adaptées de la formulation de Smith et McLean (1977). Des premiers tests et une analyse de sensibilité du modèle à l'échelle du lagon ont été réalisés pour des forçages typiques (ex. fig. 2.17). Nous souhaitons poursuivre ce volet mais nous ne pouvons réaliser de réelle calibration ou validation du modèle sans disposer d'instrument de mesure adapté de type granulomètre *in situ* ou instrument acoustique (Acoustic Backscatter Sensor). Le développement du modèle de transport de sable reprendra dès que nous disposerons d'un de ces instruments. L'achat d'un granulomètre financé par l'ACI "Observation de la Terre" est programmé pour 2004 (voir plus loin).

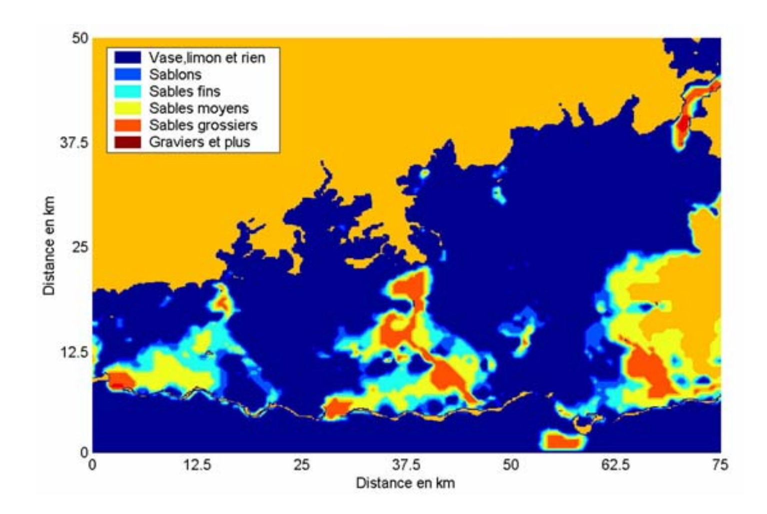


Fig. 2.17 *Zones potentielles d'érosion pour des particules de taille variable par alizé (110°) de 10 m/s [Bouron-Morin 2001]*

Modélisation du champ de vagues et influence sur la dynamique particulaire [Douillet *et al.* en préparation pour *J Atm Ocean Techn*]

Rien d'étonnant, naturellement, à ce que le passage de l'air à l'eau, et de la paix du laboratoire aux branlades de la houle alizéenne, réserve des surprises et oblige à une si laborieuse mise au point.

Théodore Monod *Plongées profondes*

La mesure des vagues dans le lagon n'est pas si aisée que nous le pensions à l'origine. La houle du large ne pénètre pas dans le lagon qui n'abrite en général que des vagues de vent d'assez faible amplitude. Le lagon se comporte pratiquement comme un lac vis-à-vis des vagues tandis que les instruments de mesure côtiers sont généralement conçus pour mesurer la houle en provenance de l'océan. Pour valider un modèle de vagues sur l'ensemble du lagon, il nous faut mesurer les vagues en certaines zones-clés notamment dans la zone où elles sont d'amplitude maximale, or il est impossible de mesurer par 20 m de fond des vagues d'amplitude 1 à 3 m. Début 2002, l'UR CAMELIA a acquis un houlomètre Anderaa. Après quelques tentatives infructueuses consécutives à notre inexpérience, nous avons trouvé un site adapté qui a permis de réaliser des séries de mesures non directionnelles de vagues (point signalé par une étoile en fig. 2.18). Il s'agit d'un récif en dôme, un monticule qui monte des fonds de 20 m jusqu'à 2 m sous la surface, suffisammment étroit pour que nous puissions supposer y mesurer les vagues se propageant juste à côté sur des fonds de 20 m.

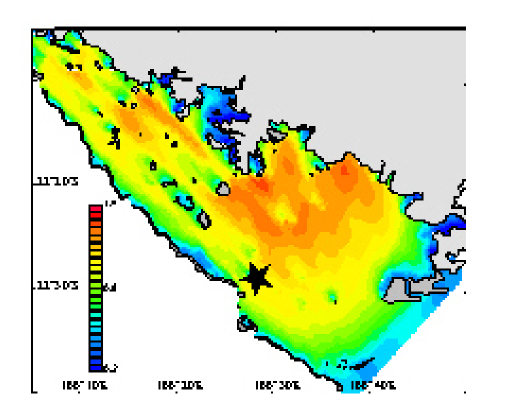


Fig. 2.18 *Champ de hauteur significative de vagues de vent le 6 juillet 2003 à 10h30*

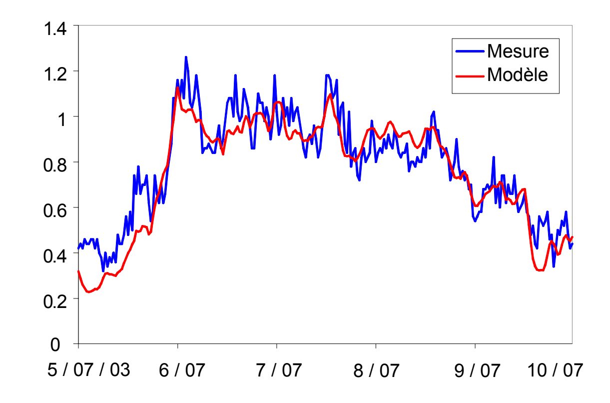


Fig. 2.19 *Hauteur significative des vagues (en m) en régime instationnaire (station ★ fig.2.18) : comparaison mesure-simulation*

En terme de modèle, notre choix s’est porté vers l’adaptation du code WAVEWATCH III développé par Hendrik Tolman à la NOAA/NCEP (US National Centers for Environmental Prediction) [e.g. Tolman 1991, 1999]. Il s'agit d'un modèle spectral simulant la génération et la propagation des vagues de vent. L'équation résolue par direction et par fréquence de vagues est l'équation de transport de l'action, définie comme étant l'énergie divisée par la pulsation de la vague. WAVEWATCH III est un modèle dit de ‘troisième génération’, les générations de modèles se distinguant par la formulation des termes qui décrivent les interactions non linéaires entre différentes vagues de fréquences liées. Sa validation et sa connexion au modèle hydrosédimentaire ont démarré en 2002 en collaboration avec L. Schmied. Elles ont donné lieu à un stage de DESS [Aouad 2002] et à un projet de fin d’étude ingénieur [Bel Madani 2003].

Les illustrations présentent des résultats typiques du modèle (fig. 2.18) et leur confrontation à des mesures non directionnelles de vagues en un point du lagon (fig. 2.19). Ces résultats ainsi que la comparaison des périodes mesurées et simulées sont très encourageants. Notons que le modèle de vagues peut prendre en compte un champ de courant fourni par le modèle hydrodynamique. Le champ de vagues est à présent intégré au calcul des contraintes de fond considérées par le modèle de transport particulaire et qui résultent de l'interaction entre vagues et courants [Grant et Madsen 1979, Huynh-Thanh et Temperville 1991, Soulsby 1997]. Les prochains développements concernent la validation du modèle de vagues à partir de mesures directionnelles -nous avons pour cela acquis un ADV Sontek muni d'un capteur de pression haute précision fin 2003- et la validation du couplage des modèles courants-vagues-particules.

3. Télédétection visible et Matières En Suspension en zones côtières

Elle est retrouvée.
Quoi ? L'éternité.
C'est la mer allée
Avec le soleil.

Arthur Rimbaud *L'éternité*

Mon deuxième axe de recherche concerne les applications de la télédétection passive (couleur de l'eau) à la détermination des champs de MES en eaux côtières. Pour répondre au besoin de données synoptiques horizontales nécessaires pour tester, nourrir et valider les modèles de transport, j'ai initié et développé cet axe de recherche au sein du LSEET dès 1994, en collaboration avec Philippe Forget, puis au sein de l'UR CAMELIA à partir de 2001. La synthèse de mes activités en télédétection est précédée, dans les trois paragraphes qui suivent, d'un rappel très succinct des principes de la télédétection visible en zones côtières. Pour une présentation complète du sujet, je renvoie le lecteur intéressé aux livres de Mobley (1994) et Kirk (1994) ou au document de synthèse de l'International Ocean-Colour Coordinating Group [IOCCG 2000] que l'on peut télécharger gratuitement (http://www.ioccg.org).

La lumière solaire directe et diffuse qui arrive à la surface de la mer se répartit entre la lumière réfléchie et la lumière transmise à la colonne d'eau. Les rayonnements transmis connaissent des fortunes diverses : absorption et diffusion par les molécules d'eau et par toutes les substances en présence dans l'eau, et réflexion ou absorption par le fond. Le rayonnement qui re-traverse ensuite l'interface eau-air et qui ne représente qu'une part infime du rayonnement solaire incident (quelques %) traduit, par la distribution spectrale de son énergie, les capacités d'absorption et de diffusion de l'eau et des substances dissoutes et particulaires présentes. Le flux lumineux que reçoit l'œil ou le radiomètre orienté vers la surface de la mer est une luminance (flux d'énergie par unité de surface apparente de la source et par unité d'angle solide; en anglais : radiance). Le rapport de la luminance à l'éclairement solaire (en anglais : irradiance) est appelé "réflectance de télédétection" ("remote-sensing reflectance") et noté R_{rs} (unité : sr^{-1}). Le rapport de l'éclairement ascendant à l'éclairement solaire, sans dimension, est appelé "réflectance" et noté R. Entre les deux paramètres existe la relation $R = Q\ R_{rs}$, où Q est un facteur supérieur à π sr et fréquemment proche de 5 sr qui rend compte de la directionnalité du rayonnement (généralement non isotrope) réémis à la surface de la mer.

Morel et Prieur (1977) ont introduit la distinction entre les eaux dites "du cas 1", dont les propriétés optiques co-varient avec la teneur en phytoplancton, et les autres dites "du cas 2". L'essentiel des eaux hauturières est du cas 1 tandis que les eaux côtières influencées également par les substances dissoutes colorées ou les particules inorganiques en suspension sont des eaux du cas 2. Les recherches en optique marine et leurs applications ont d'abord été focalisées sur les eaux du cas 1. Les eaux du cas 2 n'étaient l'objet que d'études isolées jusqu'à la préparation des produits dérivés de radiomètres océanographiques multispectraux dans la seconde moitié des années 90. La création de l'IOCCG en 1996 illustre cet intérêt scientifique récent pour les eaux du cas 2.

Les premières applications côtières de la télédétection visible reposaient sur une approche empirique qui consiste à exprimer ponctuellement la réflectance en fonction des teneurs locales en particules [Sydor 1980; Viollier et Sturm 1984; Stumpf et Pennock 1989; Froidefond *et al.* 1991] ou en phytoplancton. C'est la démarche que nous avons adoptée avec P. Forget en 1994 dans des panaches fluviaux méditerranéens pour les particules, puis avec A. Petrenko dans le Golfe du Lion

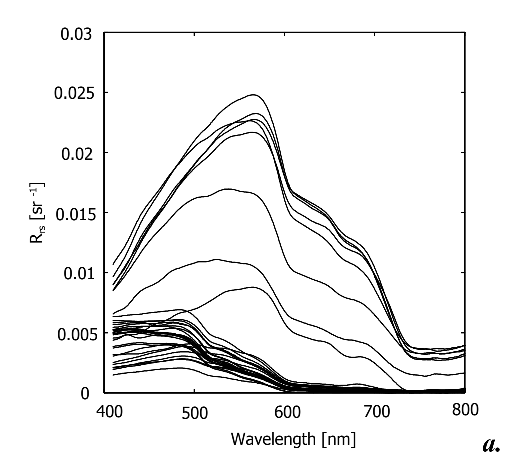
pour la chlorophylle-a, et que je poursuis dans le Pacifique. A l'approche empirique des thématiciens peut se substituer l'approche analytique ou semi-analytique des opticiens qui consiste à interpréter les valeurs spectrales de R ou de R_{rs} (propriétés optiques "apparentes") en fonction des propriétés optiques "inhérentes" au milieu, à savoir absorption et diffusion. Bien que n'étant pas opticiens, P. Forget et moi avons élargi notre approche à la physique de la mesure dans le cadre de la thèse de Florence Lahet (1999) pour extraire une information plus précise des données spatiales.

Ces activités ont toujours eu pour vocation d'améliorer méthodes d'inversion et algorithmes afin d'étendre le champ des mesures accessibles en zones côtières - parfois difficiles à instrumenter - aux données de télédétection visible. Dans ce chapitre, mes activités de recherche sont regroupées suivant trois volets : la mesure optique, l'élaboration d'algorithmes bio-optiques et leur application à l'inversion d'images satellitales, et enfin la physique de la mesure.

3.1 Mesure optique

Jean-Marie Froidefond, CR CNRS à l'Université de Bordeaux-I, m'a initié aux mesures optiques en 1994. Je le remercie vivement d'avoir donné le coup de pouce nécessaire au démarrage de cette activité au LSEET. En 1994, nous avons réalisé ensemble une série de mesures de réflectance de surface à l'embouchure du Rhône à l'aide d'un radiomètre Spectron SE590 à 256 canaux dans la gamme 400-1100 nm. En 1996, j'ai acheté pour le LSEET un radiomètre Ocean Optics à 1024 canaux dans la gamme 400-900 nm qui donne accès au spectre de réflectance au-dessus de la surface. Depuis, je me suis consacré à la mise au point et à l'amélioration récurrente des protocoles de mesure et des procédures de traitement, en concordance avec les recommandations de la NASA (programme SIMBIOS, protocole SeaWiFS) : en 1996 et 1997 à l'embouchure de l'Ebre ; sur le panache du Rhône en 1998 et 1999 ; puis en 2000 et 2001 sur le Golfe du Lion lors de 5 campagnes SARHYGOL [voir § 3.2]. Pour ce qui concerne les protocoles de mesure, j'ai adopté depuis 2000 le protocole proposé par Mobley (1999) qui est l'un des protocoles recommandé par la NASA pour les mesures optiques de surface [Mueller *et al.* 2000].

Fin 2001, j'ai obtenu un financement pour l'acquisition d'un radiomètre hyperspectral 2048 canaux 350-1000 nm, USB2000 Ocean Optics, avec lequel j'effectue des mesures régulières dans le lagon de Nouvelle-Calédonie. Une campagne a également eu lieu en avril 2003 à Fidji, second site de travail de l'UR CAMELIA. Compte tenu de l'adoption par plusieurs équipes étrangères de nos méthodes et protocoles et du matériel Ocean Optics, un second radiomètre hyperspectral m'a été offert par le fournisseur fin 2003, ce qui nous permet de multiplier les points de mesure et la zone d'extension de vérité-mer à l'occasion des passages satellitaires. La figure 3.1 présente des exemples de mesures optiques hyperspectrales réalisées dans le golfe du Lion en 2000-2001 (fig. 3.1.a) et à l'embouchure du Rhône en crue en 1994 (fig. 3.1.b).



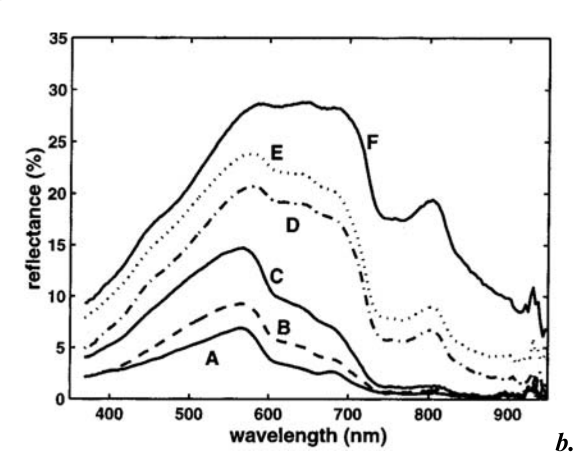


Fig. 3.1 *Mesures optiques hyperspectrales (exemples). (a) R_{rs} dans le Golfe du Lion (campagnes Sarhygol).(b) R à l'embouchure du Rhône en crue pour des concentrations en MES de 4 à 230 mg/l*

3.2 *Algorithmes bio-optiques, méthodes et applications*

Sites méditerranéens

L'inversion d'images satellitales permet par exemple de fournir des cartes de concentrations en MES ou en pigments chlorophylliens dans les eaux de surface. L'inversion nécessite deux étapes préalables auxquelles je me suis consacré : l'établissement de lois d'étalonnage réflectance-concentration pour différents capteurs (SPOT "XS" pour "multi-spectral", Landsat "TM" pour Thematic Mapper", MERIS) et le prétraitement des images (corrections atmosphériques, effets de surface). L'étape de correction atmosphérique est primordiale car 90% environ du signal lumineux capté par le satellite provient de l'atmosphère [Antoine *et al.* 2003]. Les corrections atmosphériques des images traitées au LSEET ont été réalisées à l'aide d'un modèle de transfert radiatif développé au Laboratoire d'Optique Atmosphérique de Lille : le code 6S [Vermote *et al.* 1997]. L'inversion des données a ensuite été effectuée à partir de lois empiriques que nous avons établies localement. J'ai par ailleurs proposé une nouvelle méthode d'inversion semi-analytique adaptée à des eaux peu turbides et stratifiées.

Algorithme optique pour la concentration en MES dans le panache du Rhône et inversion d'images [Ouillon *et al.* 1997, Forget et Ouillon 1998]

Les mesures réalisées avec J.M. Froidefond nous ont permis de proposer des algorithmes d'inversion empiriques pour les concentrations en Matières En Suspension dans le panache du Rhône. Ces algorithmes sont obtenus en convoluant les spectres de réflectance et la sensibilité spectrale de la bande du capteur considérée (cf ex : fig. 3.2 et 3.3).

Les algorithmes ont été appliqués à des images du panache du Rhône. Deux images SPOT prises les 10 et 26 nov. 1994 (ex: fig. 3.4) ont d'abord été traitées. L'estimation des concentrations a été considérée correcte à un facteur 2 près [Ouillon *et al.* 1997].

Ce travail a ensuite été étendu à des données Landsat 5 du 15 nov. 94 (fig. 3.5). Les structures turbides mises en évidence sur les cartes de MES pour des forçages variés (mistral, crue, absence de vent, vent tournant) ont été interprétées à partir de cartes de courant obtenues par les radars VHF du LSEET [Forget et Ouillon 1998].

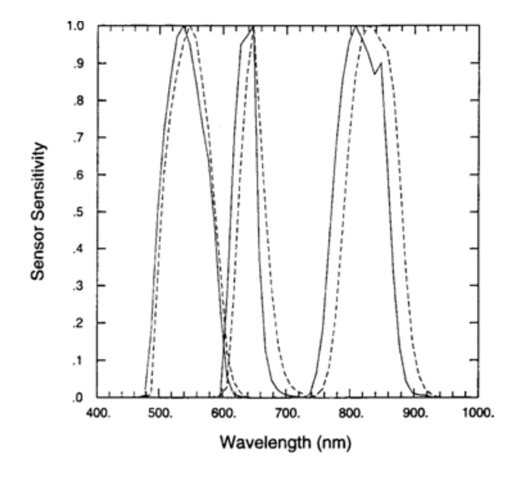


Fig. 3.2 *Sensibilité spectrale relative des bandes XS1, XS2 et XS3 de SPOT-3*
___ HRV1 - - - HRV2

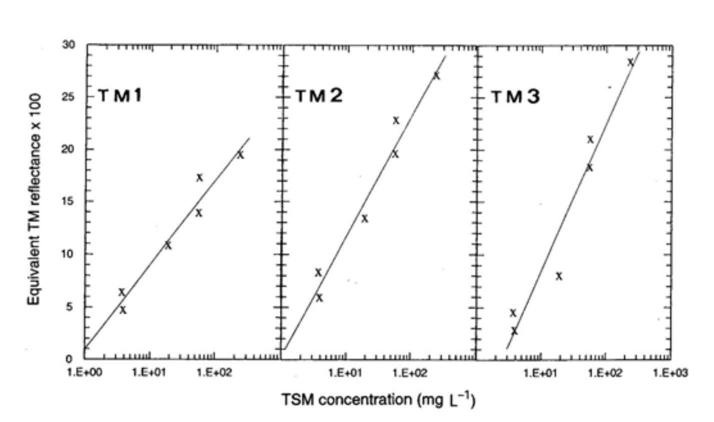


Fig. 3.3 *Algorithme empirique [MES]-réflectance à l'embouchure du Rhône pour Landsat TM, Nov. 94*

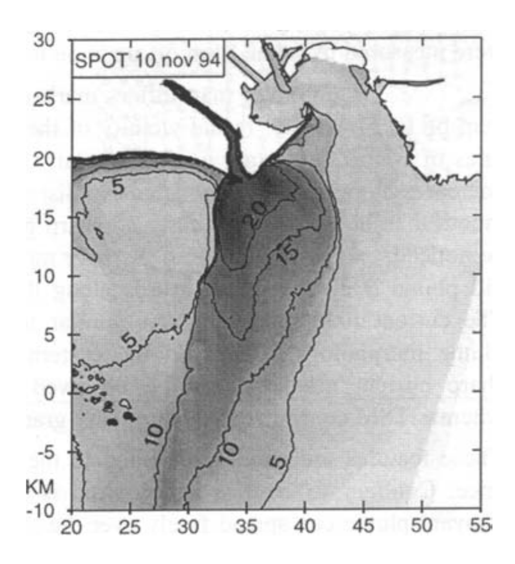


Fig. 3.4 Concentration de Matières En Suspension (en mg/l) dans le panache du Rhône en crue par vent de NO à partir de données SPOT, 10 nov. 94

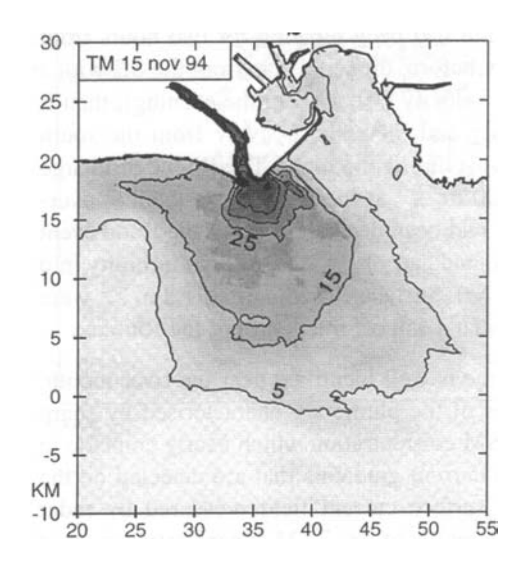


Fig. 3.5 Concentration de Matières En Suspension dans le panache du Rhône à partir de données Landsat en absence de vent, 15 nov. 94

Citations de Ouillon et al. (1997) : Froidefond *et al.* (1998), Cheng *et al.* (1998), Vasilkov *et al.* (1999), Ruddick *et al.* (2000), Doxaran *et al.* (2002), Liu *et al.* (2003)

Citations de Forget et Ouillon (1998) : Mikkelsen (2002a), Doxaran *et al.* (2002), Liu *et al.* (2002), Salen-Picard *et al.* (2003), Larouche *et al.* (2003), Zhang *et al.* (2003), Alliot *et al.* (2003), Clementson *et al.* (2004).

Nouvelle méthode d'inversion de la réflectance sur les eaux peu chargées et stratifiées - Panache de l'Ebre [Ouillon 2003]

En 1996 et 1997, deux campagnes de mesure à l'embouchure de l'Ebre ont révélé la faible turbidité du panache (concentrations en MES inférieures à 10 mg/l) par rapport au panache rhôdanien. Puisque la couleur de l'eau du panache dépend à la fois du panache lui-même et des eaux sous-jacentes, l'inversion des images spatiales en terme des seules concentrations de surface, qui est généralement pratiquée, devenait inadaptée. J'ai proposé et développé à cette occasion une nouvelle méthode d'inversion.

Cette méthode consiste à interpréter les réflectances à partir d'une "concentration optiquement équivalente" (C_{OE}) calculée par la pondération du profil vertical de concentration en MES avec une fonction exponentielle décroissante représentative du profil d'éclairement dans la colonne d'eau. Le concept d'une estimation par télédétection d'un paramètre physique (propriété optique inhérente ou concentration) à partir des profils de ce paramètre et du coefficient d'atténuation diffuse de la lumière a été proposé par Gordon et Clark en 1980. La méthode C_{OE} consiste en une simplification de la méthode de Gordon et Clark puisqu'elle ne fait intervenir que le profil de concentration en MES dans la colonne d'eau et ne requiert pas la mesure de profils d'atténuation. Dans la méthode C_{OE}, le facteur de décroissance de la lumière dans la colonne d'eau est déterminé par optimisation. Trois formulations simples ont été testées pour exprimer ce facteur à partir d'une constante et éventuellement de paramètres supplémentaires (profondeur du disque de Secchi ou concentration locale en MES). Dans les trois cas, la constante a été déterminée comme celle qui procure la corrélation maximale entre réflectance de surface et concentration optiquement équivalente. Il s'agit d'une constante définie pour une longueur d'onde ou une bande spectrale donnée, puisque les propriétés d'absorption et de diffusion de la lumière par l'eau marine qui la conditionnent implicitement varient avec la longueur d'onde. Mon objectif était de proposer une méthode qui puisse être mise en œuvre simplement pour l'interprétation des données satellitales et qui ne soit pas

réservée aux opticiens, participant à une utilisation plus étendue des données de télédétection encore trop sous-employées par les thématiciens.

La méthode C_{OE} est décrite en détail dans l'article joint en annexe. Elle améliore très sensiblement l'inversion des données en milieu relativement peu turbide [voir notamment la fig. 3, Ouillon 2003]. Chaque canal correspondant à une concentration pondérée sur une profondeur différente, cette méthode permet en outre de reconstituer en chaque point d'une image un profil schématique de concentration en MES sur deux (SPOT XS) ou trois (TM) couches superposées dans la zone marine superficielle. Elle a été appliquée et validée sur quatre images SPOT et Landsat TM du panache de l'Ebre. La figure 3.6 en présente une illustration à partir de l'image SPOT du 6 juillet 1997 sur le panache de l'Ebre. Les données du canal XS2 permettent de dresser une carte des concentrations de surface sur une profondeur d'environ 1.4 m c'est-à-dire dans le panache (fig. 3.6.a), tandis qu'une combinaison des canaux XS1 et XS2 est utilisée pour dresser une carte des concentrations sous-jacentes (fig. 3.6.b).

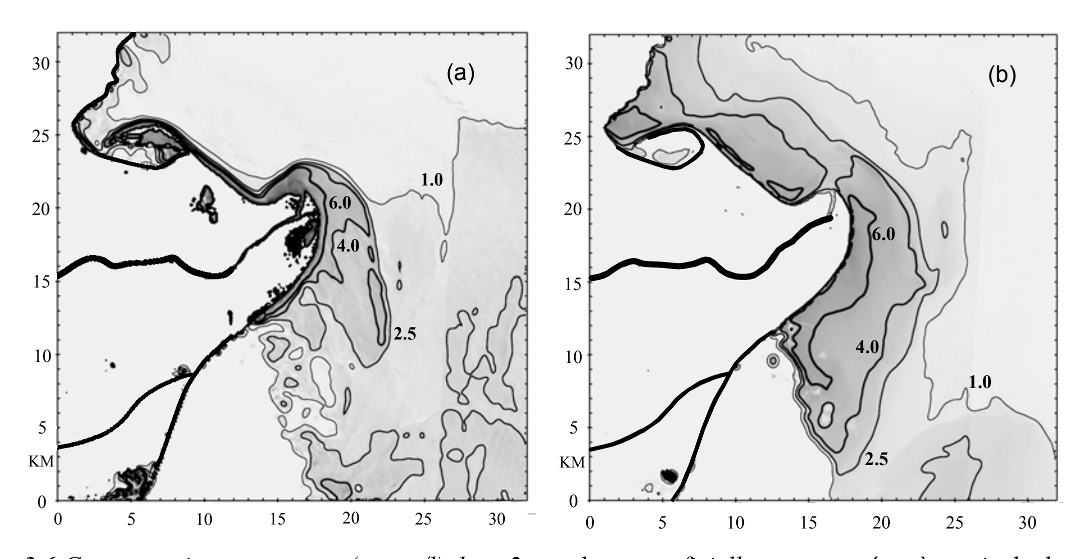


Fig. 3.6 *Concentrations moyennes (en mg/l) dans 2 couches superficielles superposées, à partir de données SPOT XS1 et XS2. Embouchure de l'Ebre, 6 Juillet 97. (a) de la surface à 1.4 m (b) de 1.4 m à 2.8 m*

Ces cartes mettent en évidence les deux facteurs principaux de la turbidité dans la région de proche embouchure, les apports fluviaux d'une part (fig. 3.6.a) et la remise en suspension littorale par les vagues dont les structures très différentes suivent les lignes de bathymétrie (fig. 3.6.b), d'autre part. Ce dernier facteur n'a pu être mis en évidence que par l'application de la méthode C_{OE} à deux bandes spectrales qui permet de déceler des structures turbides sous la couche de surface.

La reconstitution de couches turbides superposées en une station de vérité-mer (fig. 3.7) montre que la méthode a permis, sur cette station, de déterminer la concentration moyenne avec une erreur de 2% sur la couche de surface et de 22% pour la couche sous-jacente.

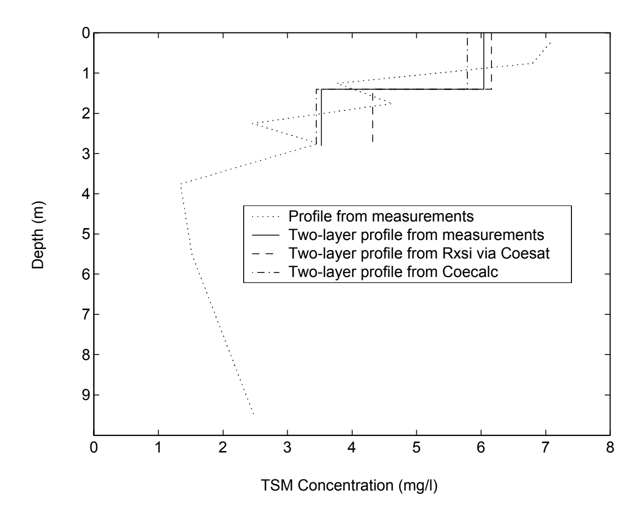


Fig. 3.7 *Reconstitution d'un profil de concentration à deux couches sous la surface à partir de mesures(__) et à partir de données SPOT XS1 et XS2 (- - -) sur une station de vérité-mer le 6 juillet 1997*

Il convient d'insister sur le fait que le panache de l'Ebre s'est prêté de manière exceptionnelle au développement de cette méthode d'inversion, pour deux raisons essentielles : (1) le panache de

l'Ebre est généralement supercritique et se déverse en milieu microtidal, les eaux sont donc nettement stratifiées en zone de proche embouchure; (2) la charge turbide à l'embouchure est généralement assez peu importante (concentration de l'ordre de 5 mg/l ou inférieure).

Intercomparaison de protocoles de mesures et Algorithmes optiques pour la chlorophylle dans le Golfe du Lion [Ouillon et Petrenko soumis]

La Méditerranée est connue pour être une zone sur laquelle les algorithmes bio-optiques classiques établis à partir de large base de données, tels les algorithmes OC2 et OC4 [O'Reilly *et al.* 1998, 2000] utilisés pour l'inversion de données SeaWiFS, sont défaillants. Les eaux oligotrophes méditerranéennes apparaissent en effet plus vertes sur les images qu'elles ne le seraient si les seuls pigments chlorophylliens en expliquaient la couleur. Ceci semble dû à la présence dans les eaux de l'ensemble du bassin méditerranéen de poussières du Sahara [Claustre *et al.* 2002]. Si l'on veut utiliser en routine des images visibles sur le Golfe du Lion ou plus généralement en Méditerranée nord-occidentale (cadre du PNEC par exemple), il est important d'établir des algorithmes spécifiques à cette région, voire de proposer une inversion adaptée par zones et/ou par saisons.

Profitant des campagnes régulières dans le Golfe du Lion pour le programme SARHYGOL (cf p. 18), nous avons entrepris, A. Petrenko et moi, une série de mesures de réflectance de surface dans un double objectif : (1) comparer les mesures de réflectance hyperspectrale que j'effectuais avec les mesures de réflectance multispectrales qu'A. Petrenko réalisait à l'aide d'un radiomètre polarisé développé au Laboratoire d'Optique Atmosphérique de Lille, le SIMBAD ; (2) analyser la variabilité spatiale de réflectance au sein du Golfe, dans le panache du Rhône et hors panache, afin de valider les algorithmes généraux d'inversion en terme de chlorophylle-a ou d'en proposer des alternatives. L'étude repose sur des mesures effectuées durant 5 campagnes SARHYGOL en 2000 et 2001 (fig. 3.8 et 3.1.a).

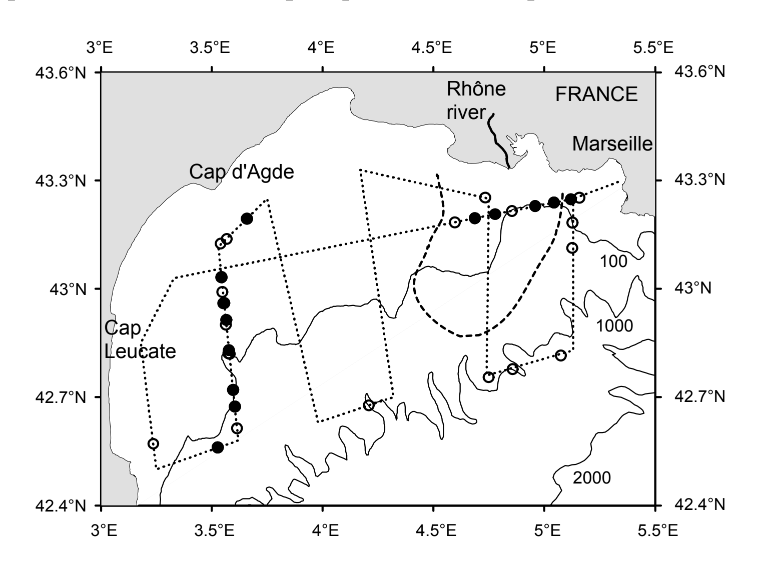


Fig. 3.8 *Trajectoire des campagnes SARHYGOL (pointillé) et stations de mesures optiquesOcean Optics (OO+SIMBAD : cercles noirs)*

La comparaison des réflectances mesurées par radiomètre hyperspectral et radiomètre multispectral polarisé montre que les deux instruments fournissent des données proches. L'écart moyen entre les réflectances à 490 nm (notées ensuite R490) est de 25% sur 13 stations. Les algorithmes classiques de quantification de la chlorophylle sont basés sur les rapports de bandes choisies à partir des proprités de diffusion et d'absorption des pigments chlorophylliens. Les deux radiomètres fournissent des rapports de réflectance dont la différence est en moyenne de 6.5% (fig. 3.9). En conséquence, nous pouvons utiliser l'un ou l'autre de ces instruments pour la mesure des rapports de réflectance de surface.

Nous avons ensuite testé la performance des algorithmes existants à déterminer la concentration en chlorophylle-a (chl*a*) à partir des données hyperspectrales Ocean Optics. Ceci peut être utile indirectement pour quantifier avec plus de précision les concentrations en MES dans la mesure où le signal optique côtier est contraint par 3 types de composants : le phytoplancton, les MES et les substances organiques dissoutes colorées. L'examen des rapports de réflectance sur l'ensemble de nos données (fig. 3.10) montre qu'il paraît illusoire de chercher à déterminer chl*a* à partir d'un seul rapport de réflectance sur l'ensemble des eaux rencontrées dans le Golfe du Lion. Deux types d'eau

présentent des rapports de réflectance très distincts pour des chl*a* voisines. Ces deux types d'eau peuvent être aisément distinguées, celles pour lesquelles R490 < R555 signalant une présence significative de substances jaunes et/ou de particules inorganiques en suspension. Nous avons assimilé ces eaux à celles de la région proximale de la "ROFI" (Region Of Freshwater Influence, introduite par Simpson 1997) et les eaux pour lesquelles R490 > R555 à la région distale de la ROFI. Les algorithmes généraux tels les algorithmes SeaWiFS de O'Reilly *et al.* (1998, 2000) sont globalement défaillants sur nos mesures (r^2=0.53), surtout sur la zone proximale du panache du Rhône (r^2=0.35). Les algorithmes régionaux [Gitelson *et al.* 1996, Bricaud *et al.* 2002, D'Ortenzio *et al.* 2002] ont des performances équivalentes ou meilleures en zone distale et moins bonnes en zone proximale. La recherche d'un algorithme empirique "optimal" en zone distale à partir de nos données conduit à un algorithme très proche de celui de Bricaud *et al.* (2002). L'algorithme proposé par Tassan (1994) ne fournit pas une bonne estimation de chl*a* en zone proximale mais il introduit un paramètre intermédiaire basé sur 4 valeurs de réflectance qui nous a paru adapté à la quantification de chl*a*. Nous avons donc proposé un algorithme empirique bâti sur ce paramètre en soulignant qu'une étude s'appuyant sur plus de points de mesure en zone proximale serait nécessaire pour affiner l'algorithme en question.

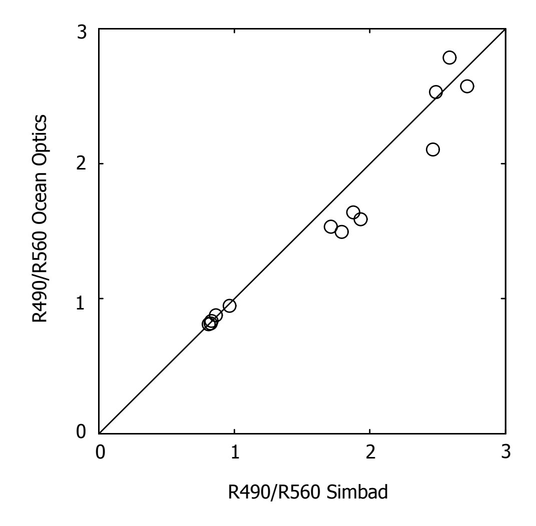


Fig. 3.9 *Rapports de réflectances obtenus simultanément par les radiomètres O.Optics et SIMBAD*

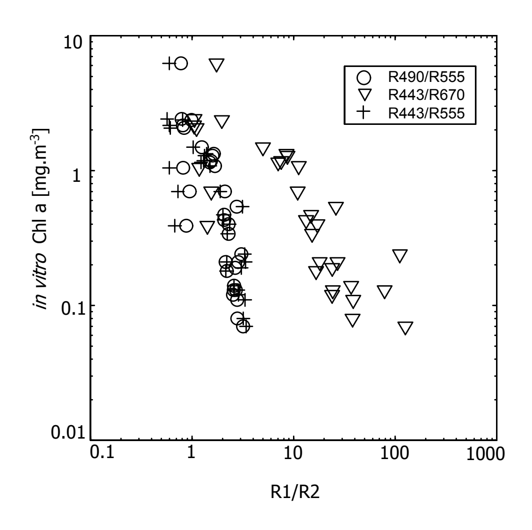


Fig. 3.10 *Chla en fonction des rapports de réflectance pour l'ensemble du Golfe du Lion*

Pacifique sud-ouest

Algorithme optique de la turbidité dans le lagon de Nouvelle-Calédonie [Ouillon *et al.* 2004]

Dans l'objectif de dresser des cartes de turbidité dans le lagon à partir de données satellitales multispectrales pour valider les modèles, plusieurs campagnes de mesures légères ont été conduites en 2002-2003. Des profils de turbidité ont été enregistrés à chaque point de mesure optique à l'aide d'un turbidimètre Seapoint placé sur une sonde CTD Seabird SBE19. La loi d'étalonnage qui en a résulté pour le capteur ETM+ sur Landsat 7 (fig. 3.11) a été appliquée à une image du 23 octobre 2002 pour dresser une carte de turbidité dans le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. L'estimation de la turbidité présente une bonne précision puisque l'erreur moyenne, établie à partir de 14 stations de vérité-mer, est de 17.5 % pour les eaux dont la profondeur est supérieure à 14 m, ou supérieure à 10.5 m lorsque la turbidité est supérieure à 1 FTU. Une application de cet algorithme est présentée au chapitre 4.

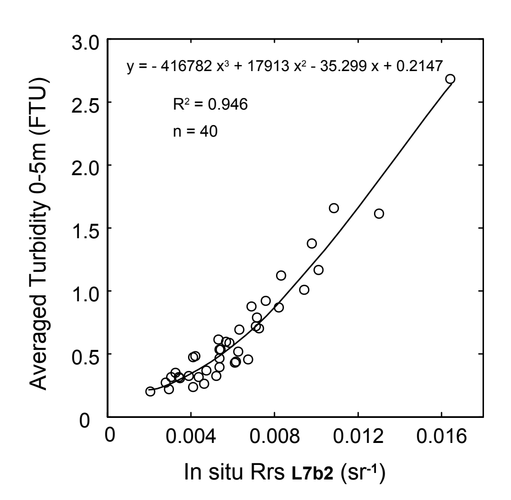


Fig. 3.11 *Algorithme empirique turbidité-réflectance dans le lagon de Nouvelle-Calédonie pour la bande 2 de Landsat 7 ETM+ ("Enhanced Thematic Mapper +")*

Algorithme optique de la turbidité dans le lagon de Suva, Viti Levu, Iles Fidji [non publié]

Contrairement au lagon de Nouvelle-Calédonie qui est le principal site-atelier de l'UR CAMELIA, les zones urbanisées du lagon de l'île de Viti Levu aux Iles Fidji (fig. 3.12) n'ont fait l'objet que de très peu d'études [Morrison et Rao 1994]. Les principaux travaux publiés mettent en évidence un niveau de contamination élevé en TBT dans les sédiments de Suva Harbour et dans des crabes consommés par la population locale, et des concentrations importantes en métaux lourds dans les sédiments et dans les tissus de mollusques que la population consomme, avec tous les risques de toxicité qui peuvent en découler.

Dans ce contexte, l'UR CAMELIA a mis en place une étude environnementale du lagon de Suva Harbour en partenariat avec l'University of South Pacific (USP) basée sur place. L'approche pluridisciplinaire adoptée est calquée sur notre approche du lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. Elle comprend notamment l'adaptation au site d'un modèle hydro-sédimentaire et d'un modèle biogéochimique. Dans un objectif de calibration et de validation du modèle de transport particulaire, une série de mesures optiques a été réalisée en avril 2003 autour de Suva (cf fig 3.13). Plusieurs algorithmes empiriques de détermination de la turbidité à partir de la réflectance en découlent. Leur application à des données Landsat est prévu pour 2004 durant la fin du stage de master de Shivanesh Rao (USP). Outre les applications locales, il sera particulièrement intéressant de comparer les algorithmes et propriétés optiques dans deux milieux coralliens très différents, l'un turbide (Fidji), l'autre peu chargé (Nouvelle-Calédonie).

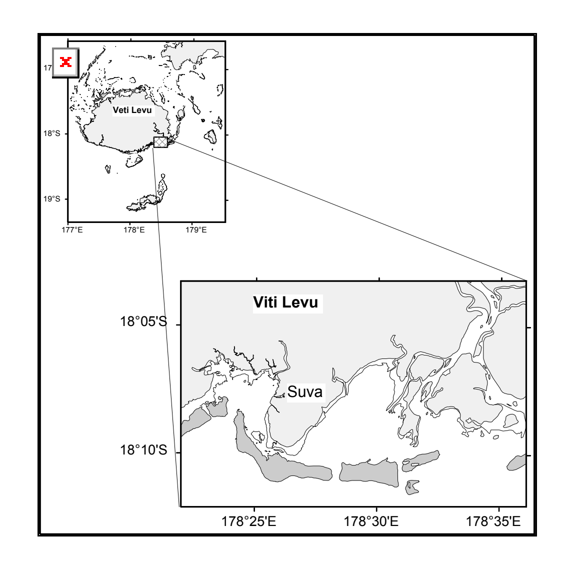


Fig. 3.12 *Site d'étude de l'UR CAMELIA à Fidji*

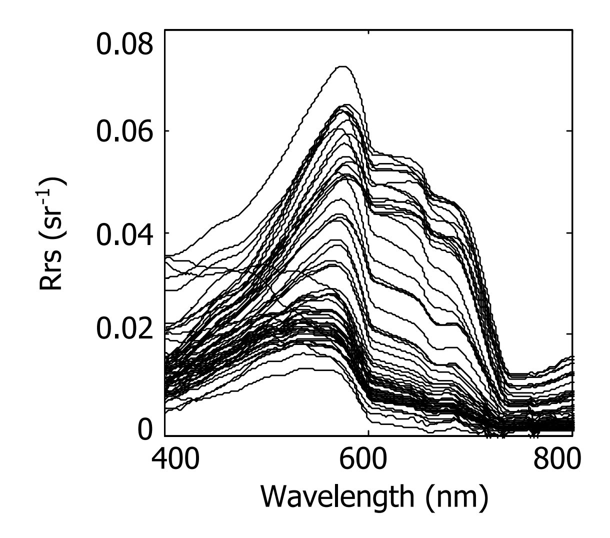


Fig. 3.13 *Réflectance (Rrs) mesurée autour de Suva en avril 2003*

3.3 Physique de la mesure

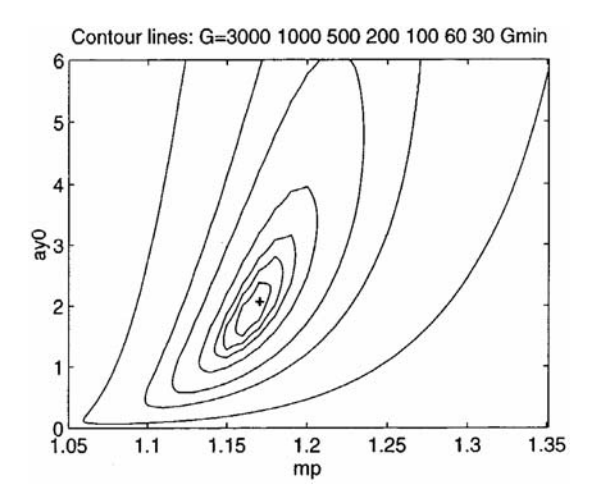
Les travaux en physique de la mesure ont pour une large part été conduites dans le cadre de la thèse de F. Lahet co-encadrée avec P. Forget. Leur objectif était de déterminer plusieurs paramètres de qualité d'eau en zones côtières à partir de données optiques, l'objectif *in fine* étant d'améliorer la précision dans l'inversion d'images multispectrales de nouvelle génération.

Nous avons pour cela adopté une approche algorithmique semi-analytique. L'approche repose sur le modèle simplifié de réflectance $R(\lambda) = f\, b_b(\lambda)/(a(\lambda) + b_b(\lambda))$ où f est un coefficient dépendant des conditions d'éclairement et où $a(\lambda)$ et $b_b(\lambda)$ sont respectivement les coefficients d'absorption et de rétrodiffusion spectraux résultant des propriétés optiques des différents composés (eau, phytoplancton, « substances jaunes » ou carbone organique dissous coloré, sédiments) [Gordon *et al.* 1975]. Absorption et rétrodiffusion s'expriment à partir des coefficients spécifiques de chaque composé et de leurs concentrations. Nous pouvons ainsi utiliser ainsi le modèle de réflectance et les propriétés optiques ou concentrations mesurées pour déterminer les inconnues en minimisant la différence quadratique entre réflectances mesurées et modélisées.

Modélisation optique simplifiée d'eaux à dominante sédimentaire [Forget *et al.* 1999]

La reconstitution de spectres de réflectances à partir de modèles optiques a d'abord été appliquée aux eaux du panache rhôdanien en période de crue et proche de l'embouchure que l'on pouvait supposer « à dominante sédimentaire », autrement dit pour lesquelles l'influence optique des pigments chlorophylliens était supposée négligeable devant celle des sédiments et des substances jaunes.

Dans ce modèle de réflectance simplifié, la rétrodiffusion de la lumière par les particules est calculée par un modèle de Mie établi pour des particules sphériques et une distribution de tailles des particules supposée standard (distribution hyperbolique de Junge, voir annexe). L'inversion du modèle permet de déterminer l'absorption à 440 nm par les substances jaunes, noté $a_y(440)$ ou a_{y0}, et l'indice de réfraction des sédiments moyenné sur la bande spectrale, noté m_p, en minimisant l'écart quadratique entre réflectance mesurée et réflectance calculée. Les isocontours de la fonction de coût pour le spectre noté C sur les fig 3.1.b et 3.15 sont présentés en figure 3.14. Les spectres reconstitués par le modèle sont comparés aux spectres mesurés en figure 3.15.



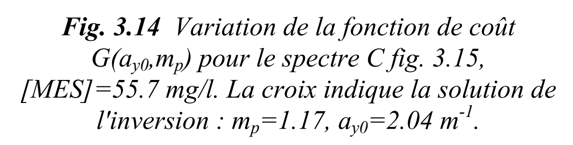


Fig. 3.14 *Variation de la fonction de coût $G(a_{y0},m_p)$ pour le spectre C fig. 3.15, [MES]=55.7 mg/l. La croix indique la solution de l'inversion : m_p=1.17, a_{y0}=2.04 m^{-1}.*

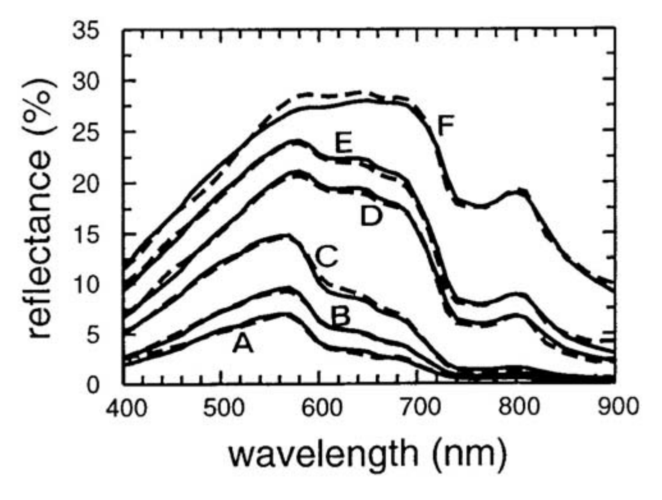


Fig. 3.15 *Comparaison des spectres mesurés (trait plein) et simulés en utilisant les valeurs optimisées de m_p et a_{y0} (tirets)*

L'originalité de ce travail est notamment d'avoir démontré, dans le cadre des approximations effectuées et pour une eau à dominante sédimentaire, que l'inversion fournit la pseudoconcentration définie par $C.(m_p^2-1)^2$ et qu'il n'est pas possible dans ce cas de déterminer l'un des deux paramètres, concentration C en particules et indice de réfraction moyen de ces particules, si l'on ne connaît pas l'autre.

Citations : Mikkelsen (2002a), Mikkelsen (2002b), Doxaran et al (2002), Galofré et al (2002), Zhan et al (2003), Raimbault et Durrieu de Madron (2003)

Modélisation optique simplifiée à 3 composantes d'eaux côtières [Lahet *et al.* 2000]

La modélisation optique a ensuite été étendue aux eaux également chlorophylliennes du panache de l'Ebre.

Un modèle de réflectance standard à trois composantes prenant en compte les influences optiques de la matière organique dissoute colorée, du phytoplancton et des particules minérales a ensuite été défini. La sensibilité du modèle aux différents constituants a été étudiée dans la thèse de F. Lahet. Ce modèle a été appliqué à la détermination simultanée de la concentration en chlorophylle a, chl*a*, de l'indice de réfraction des sédiments m_r (noté m_p lorsque moyenné sur l'ensemble du spectre dans Forget *et al.* 1999) et de $a_y(440)$. Les données expérimentales employées dans l'inversion, spectres de réflectance et concentrations en sédiments et en chlorophylle a, ont été collectées à l'embouchure de l'Ebre lors des campagnes Fliper1 et Fliper3 du programme FANS. L'inversion s'est avérée peu précise pour la détermination de chl*a*. Les valeurs de m_r et $a_y(440)$ sont comparables à celles citées dans la littérature pour des panaches fluviaux et peu sensibles aux variations de chl*a*. Les variations spectrales de l'indice de réfraction des sédiments ont été étudiées à partir des valeurs estimées de $a_y(440)$ et des concentrations en chlorophylle *a* et en sédiments (cf fig. 3.16). Nous discutons enfin dans Lahet et al [2000] la paramétrisation du compartiment phytoplanctonique et de la réflectance dans le modèle optique.

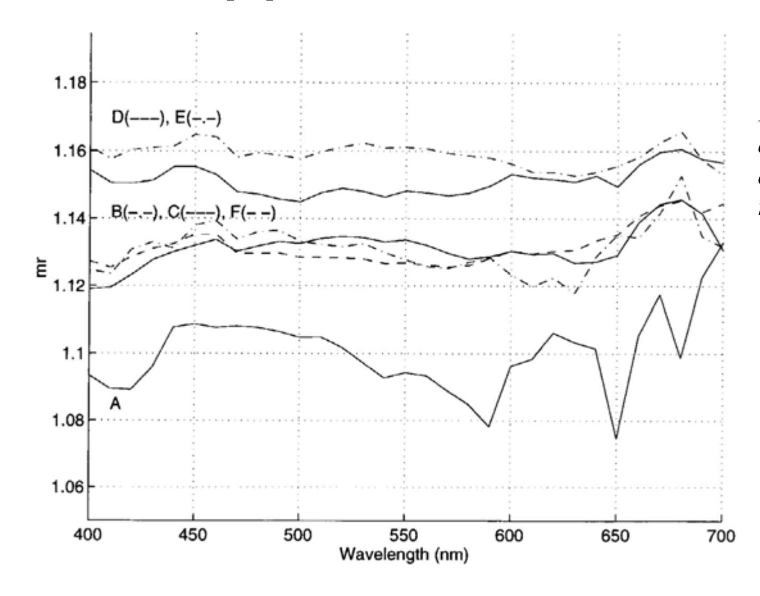


Fig. 3.16 *Variation spectrale de l'indice de réfraction des sédiments, m_r , déduite de l'inversion optimisée des spectres de réflectance*

Citations : Zhang et al (2002), Lafon et al (2002), Doxaran et al (2003), Zhang et al (2003), Zhan et al (2003)

Classification optique d'eaux côtières et application pour l'inversion de données multispectrales [Lahet *et al.* 2001a, b]

La méthode de travail que nous avons fréquemment adoptée sur l'Ebre durant les campagnes Fliper 1 et Fliper 3 consistait à suivre depuis le petit matin une bouée lâchée dans le panache aussi près que possible de l'embouchure et à effectuer régulièrement le long de sa trajectoire des mesures

hydrologiques et optiques. Un des enseignements de cette méthode fut pour moi de vérifier que les mêmes couleurs d'eaux typiques se succédaient au fur et à mesure que le flotteur s'éloignait de l'embouchure, suivant un scénario similaire d'un jour à l'autre. Invariablement les eaux en proche embouchure étaient de couleur brun-vert puis de plus en plus vertes, avant de gagner la zone de dilution aux eaux bleu-vert, et éventuellement, si l'on avait parcouru une distance suffisante ou que l'on se soit éloigné du suivi lagrangien, on gagnait les eaux bleues du large. L'idée qui s'est alors imposée était très simple : puisqu'il paraît difficile de proposer une méthode d'inversion optique précise pour l'ensemble d'un domaine côtier du fait de sa forte variabilité spatiale, pourquoi ne pas proposer des lois -et peut-être des méthodes d'inversion différentes- adaptées à chaque type d'eau ? Ce qui demande au préalable d'avoir défini une classification optique des types d'eau.

N'existait-il pas déjà une classification optique d'eaux côtières-types que l'on aurait pu utiliser ? La classification optique la plus répandue en eaux eaux côtières est due à Jerlov (1964) et elle est basée sur le coefficient d'atténuation diffuse de l'eau. C'est un paramètre que nous n'avons pas mesuré puisque je me suis jusqu'à présent restreint sur le terrain aux mesures optiques qui pouvaient être effectuées depuis l'espace, en complément des mesures hydrologiques et biologiques de base (T, S, C ou turbidité, chl*a*). Sur la base de remarques visuelles notées *in situ* sur la ou les couleurs dominantes en chaque station, nous avons donc cherché à préciser des seuils entre les grands types d'eaux à partir de valeurs spectrales de réflectance et de ses dérivées (Fig. 3.17). Pour chaque classe d'eau, des valeurs typiques de C, chl*a*, m_r et $a_y(440)$ ont été déterminées et des corrélations ont été établies entre la dérivée première de la réflectance et ces quatre paramètres [Lahet *et al.* 2001b]. La figure 3.18 montre quelques spectres typiques, ainsi que les bandes MERIS/ENVISAT.

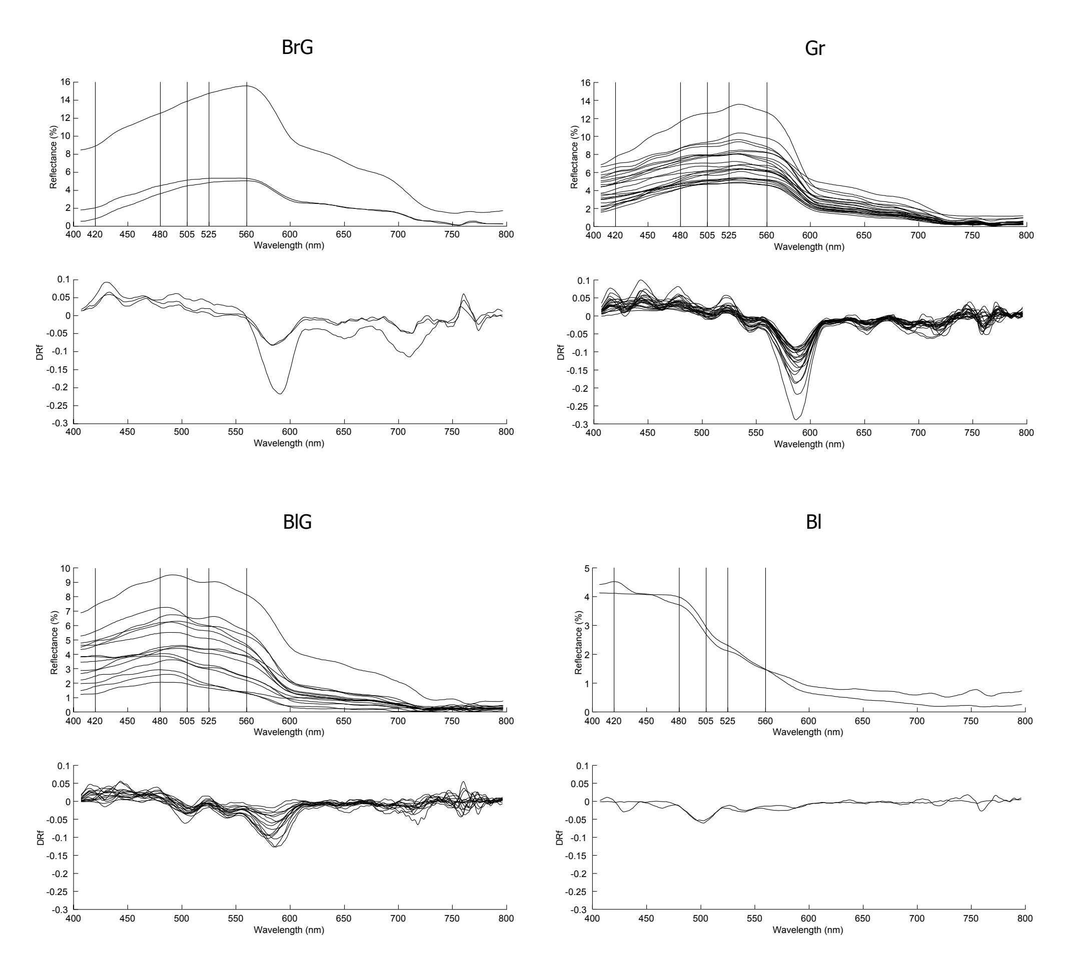


Fig. 3.17 *Réflectance et dérivée première de la réflectance pour 4 types d'eaux : Brown-Green (BrG), Green (Gr), Blue-Green (BlG) et Blue (Bl). Les spectres présentés sont issues des campagnes Fliper1 et Fliper3, embouchure de l'Ebre, nov. 96 et juillet 97*

Sur la base de cette classification optique, nous avons ensuite cherché à proposer une méthode d'inversion pour chaque type d'eau plus précise qu'une méthode générique.

Une méthode empirique et une méthode semi-analytique ont été testées afin de déterminer la concentration en sédiments C ainsi que chl*a*, m_r et $a_y(440)$ à partir de la classification optique. La première méthode est purement empirique, basée sur des corrélations établies pour chaque type d'eau entre la dérivée première de la réflectance et les valeurs de C, chl*a*, m_r et $a_y(440)$. La seconde méthode s'appuie sur l'inversion du modèle de réflectance à trois composantes présenté dans Lahet *et al.* (2000). Les spectres de réflectance mesurés et des valeurs typiques de m_r ou de m_r et $a_y(440)$, déduites de la classification optique, sont entrés dans le modèle afin de déterminer respectivement C et chl*a* ou C, chl*a* et $a_y(440)$. L'association des deux méthodes, empirique et semi-analytique, a également été testée. Elle conduit à une erreur inférieure à 50 % dans la détermination des concentrations en sédiments et en chlorophylle. La démarche consiste à évaluer chl*a* à partir d'algorithmes empiriques puis C et $a_y(440)$ par inversion du modèle de réflectance avec, comme paramètres d'entrée, la valeur moyenne de m_r typique de la classe d'eau étudiée et la valeur empirique de chl*a* [Lahet et al 2001b].

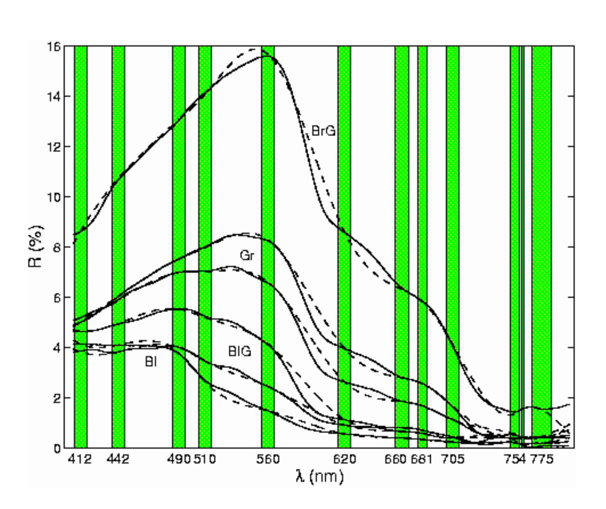


Fig. 3.18 *Réflectance typique de 4 types d'eau côtière et extension des bandes spectrales MERIS. (__) Mesures (- - -) Reconstitution par modèle*

L'extension de notre méthode de restitution des paramètres de qualité de l'eau en considérant les réflectances échantillonnées à la position des canaux MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer), capteur embarqué sur la plateforme spatiale ENVISAT, est présentée dans l'article Lahet et al [2001a].

Citations : Larouche et al (2003), Iwashita et al (2004)

Propriétés optiques des roches et minéraux [Ouillon *et al.* 1997, Ouillon *et al.* 2002]

Les propriétés optiques de différentes roches ont également fait l'objet de mesures de terrain ou de laboratoire.

En 1997, des mesures d'atténuation de la lumière dans une eau chargée d'un sédiment connu ont été réalisées à travers une cuvette en quartz, en utilisant une source de lumière artificielle au spectre étendu (tungstène-halogène). Le sédiment était constitué d'un mélange comprenant notamment un fort pourcentage de goethite, qui donnait à l'eau chargée une teinte jaunâtre caractéristique. L'échantillon avait été prélevé par Yves Lucas (Laboratoire PROTEE, Univ. Sud Toulon-Var) au Brésil. Les mesures d'atténuation pour 3 concentrations du même sédiment ont permis d'en déterminer l'atténuation spécifique, c'est-à-dire le coefficient d'atténuation par unité de masse de sédiment [Ouillon *et al.* 1997]. Les concentrations testées (120, 220, 390 mg/l), assez élevées, ont cependant pu générer des effets de diffusion multiple. Le matériel à notre disposition ne nous permettait pas de travailler à des concentrations plus faibles, et c'est pourquoi j'ai décidé de mettre en veille provisoirement l'étude des propriétés optiques de minéraux caractéristiques en suspension dans l'eau et des propriétés des mélanges.

En 2001 a démarré une autre étude consacrée à la réflectance des sables dans le cadre du projet ID-ROM financé par l'ACI Observation de la Terre (cf p.2). Le travail engagé à cette occasion a pour objet d'étudier la diversité des propriétés optiques des roches meubles dans le but de pouvoir les discriminer et de corriger au mieux l'effet des fonds meubles sur la réflectance en eaux de surface peu chargées. La figure 3.19, présentée lors d'un congrès de télédétection marine en 2002, illustre la

diversité des spectres de réflectance de 22 sables secs. Il est apparu que les spectres se différenciaient essentiellement par deux grandes caractéristiques : l'une concernant la valeur moyenne de la réflectance, d'un niveau faible (sable noir volcanique B2) à un niveau élevé (sable blanc corallien A1), et l'autre relatif à la couleur de l'échantillon caractérisé par la courbure du spectre autour de 550 nm. Une courbure croissante à 550 nm coïncide avec des sables gris (du noir au blanc) puis des sables jaune, des sables orangés et des sables rouge. Deux indices optiques ont alors été proposés pour discriminer les réflectances des sables, un indice de brillance et un indice de courbure (cf fig. 3.20). Le travail préliminaire réalisé en 2001 sur 22 échantillons de sables, secs et humides, doit être poursuivi et élargi aux échantillons de vases dans le cadre du projet BISSECOTE. Une centaine d'échantillons de sables a depuis été récolté pour ce projet et Christophe Chevillon (UR CAMELIA), qui participera à la suite du travail, possède une vaste collection d'échantillons de vases du lagon de Nouvelle-Calédonie. Nous chercherons à déterminer la composition des échantillons, indispensable dans l'analyse des mesures de réflectance si l'on va au-delà d'une simple caractérisation optique.

Ces résultats ont été consignés dans des actes de congrès mais n'ont pas encore été proposés à une revue scientifique.

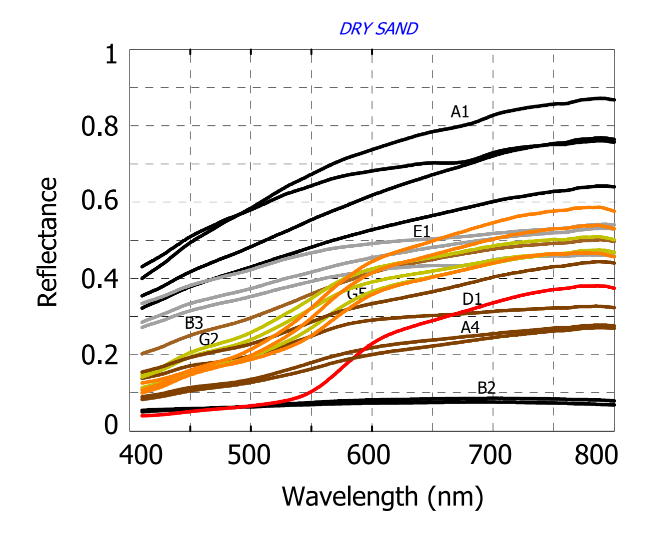


Fig. 3.19 Réflectance de 22 échantillons de sables secs d'origines variées

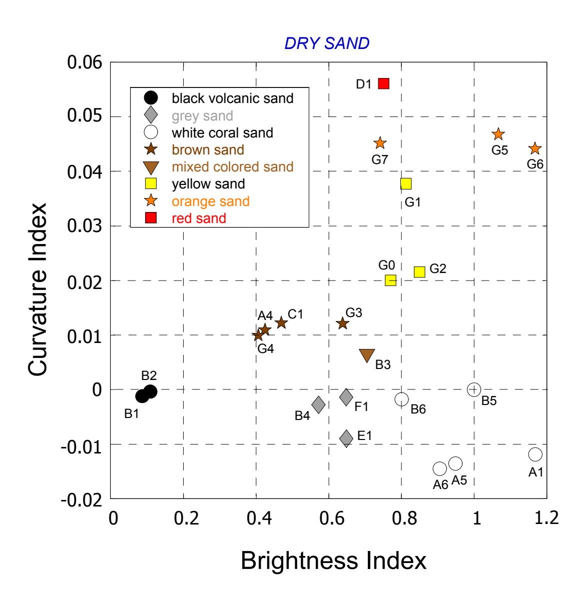


Fig. 3.20 Discrimination de 22 échantillons de sables secs à l'aide de deux indices optiques

4. Approche intégrée de la dynamique particulaire (images, mesures, modèles) et Analyses

Vieil océan… tu ne laisses pas facilement deviner aux yeux avides des sciences naturelles les mille secrets de ton intime organisation; tu es modeste. L'homme se vante sans cesse, et pour des minuties. Je te salue, vieil océan !

Lautréamont *Les chants de Maldoror, I*

Le troisième de mes axes de recherche complète naturellement les deux précédents puisqu'il concerne l'étude des processus de transport de MES en zones côtières et s'appuie conjointement sur des mesures *in situ*, de la télédétection passive et des modèles numériques.

Dans ce cadre, la télédétection fournit des données synoptiques "horizontales" des sites étudiés qui complètent les mesures *in situ*, lesquelles fournissent en général des données ponctuelles ou suivant des profils verticaux. Outre leur utilité pour calibrer et valider les modèles, les données satellitales visibles permettent également d'enrichir l'analyse concernant l'hydrodynamique locale et les processus complexes impliqués dans le transport de MES en zones côtières [Ouillon *et al.* 1998]. En amont de tout aspect quantitatif, le modèle peut bénéficier de l'analyse des images pour identifier certains processus pertinents qui doivent être intégrés au modèle (impact de la circulation méso-échelle sur la circulation locale, hétérogénéité de la distribution du vent) ou dont le modèle doit rendre compte (*e.g.* au niveau des fronts). En revanche, un modèle calibré et validé permet de reproduire les phénomènes de transport et de mélange, de reconstituer la dynamique entre deux images, et il ouvre accès à l'estimation des flux et des bilans qui n'est pas envisageable à partir des seules données de surface telles les données spatiales. Chaque programme de recherche nous a permis de mettre en évidence les interactions mesures-images-modèle et d'en bénéficier dans l'étude des sites concernés. Les travaux menés sur l'embouchure du fleuve Gambie [Ouillon et Caussade 1991], du Rhône [Forget et Ouillon 1998], de l'Ebre [Durand *et al.* 2002], puis du lagon de Nouvelle-Calédonie [Ouillon *et al.* 2004] en sont les illustrations.

Outre la mise en place d'outils numériques ou instrumentaux, nous avons démarré l'étude du transport particulaire dans le lagon de Nouvelle-Calédonie par l'analyse de 4 ans de mesures physiques en tentant de distinguer les variations saisonnières des paramètres dans le lagon de leurs variations interannuelles liées à ENSO ou à la pression anthropique. L'analyse des variations de température et salinité est présentée dans Douillet *et al.* [soumis à *Coral Reefs*], celle des variations de turbidité dans Ouillon *et al.* [en préparation pour *Marine Geology*].

Etude intégrée du panache du Rhône [Durand *et al.* 1999, Arnoux-Chiavassa *et al.* 2000]

Les premiers travaux du LSEET en télédétection visible ont concerné, dès 1994, le panache du Rhône. Avec P. Forget, nous avons fourni des cartes des concentrations en MES dans le panache établies à partir d'images SPOT et Landsat qui ont été utilisées pour valider certaines applications du modèle OCKE3D [Durand *et al.* 1999, Arnoux-Chiavassa *et al.* 1999] et du modèle SYMPHONIE [Estournel *et al.* 2001]. Dans les articles précités comme dans Forget et Ouillon (1998), l'interprétation des cartes satellitales de MES s'est également appuyée sur les cartes de courants de surface fournies par le radar VHF du LSEET [Broche *et al.* 1998].

Trois situations pour lesquelles on disposait au minimum d'une image satellitale ont fait l'objet d'une étude approfondie et de simulations numériques : une situation stationnaire typique de mistral et de débit proche du débit moyen (1800 m^3/s - 26 nov. 94); un épisode instationnaire, le vent venant de tourner du SE au NO en quelques heures pour un débit élevé de 3400 m^3/s, 3 jours après une crue exceptionnelle estimée à 9000 m^3/s (10 nov. 94); et une situation de débit sans vent (15 nov. 94). Ces situations sont particulièrement pertinentes pour tester les modèles et décrire la physique du panache dans 3 cas complémentaires.

Les tests concernaient essentiellement la capacité des modèles à reproduire les fronts visualisés sur les images satellitales (position et "étalement" des fronts marqués), les champs de vitesse mesurés par radar et l'épaisseur du panache déterminée à partir de profils CTD. Les premiers tests ont montré les limites du modèle de turbulence initialement employé (k-ε isotrope) et des schémas numériques classiques dans le code OCKE3D, ce qui a ensuite conduit S. Arnoux et N. Durand à implémenter des schémas non diffusifs de type TVD ainsi que la formulation de Munk et Anderson (1948) pour la turbulence à partir du nombre de Richardson qui jauge la stabilité de l'écoulement résultant du couplage stratification-dynamique. Les résultats (mesures et simulations) ont permis de montrer, par exemple, que la réponse des eaux légères de surface aux changements de vent est immédiate et que les eaux sous-jacentes conservent pendant plusieurs heures les caractéristiques du panache dans ses anciennes configurations. Les structures turbides ont été prises en compte pour analyser les champs de courant, le jet côtier et les zones d'upwelling et de downwelling. L'analyse suggère également que les vents tournants induisent une dispersion et un temps de résidence plus grands des nutrients apportés par le Rhône et qu'ainsi ils contribuent plus que les épisodes de mistral à l'enrichissement de la frange côtière du Golfe du Lion [Estournel *et al.* 2001].

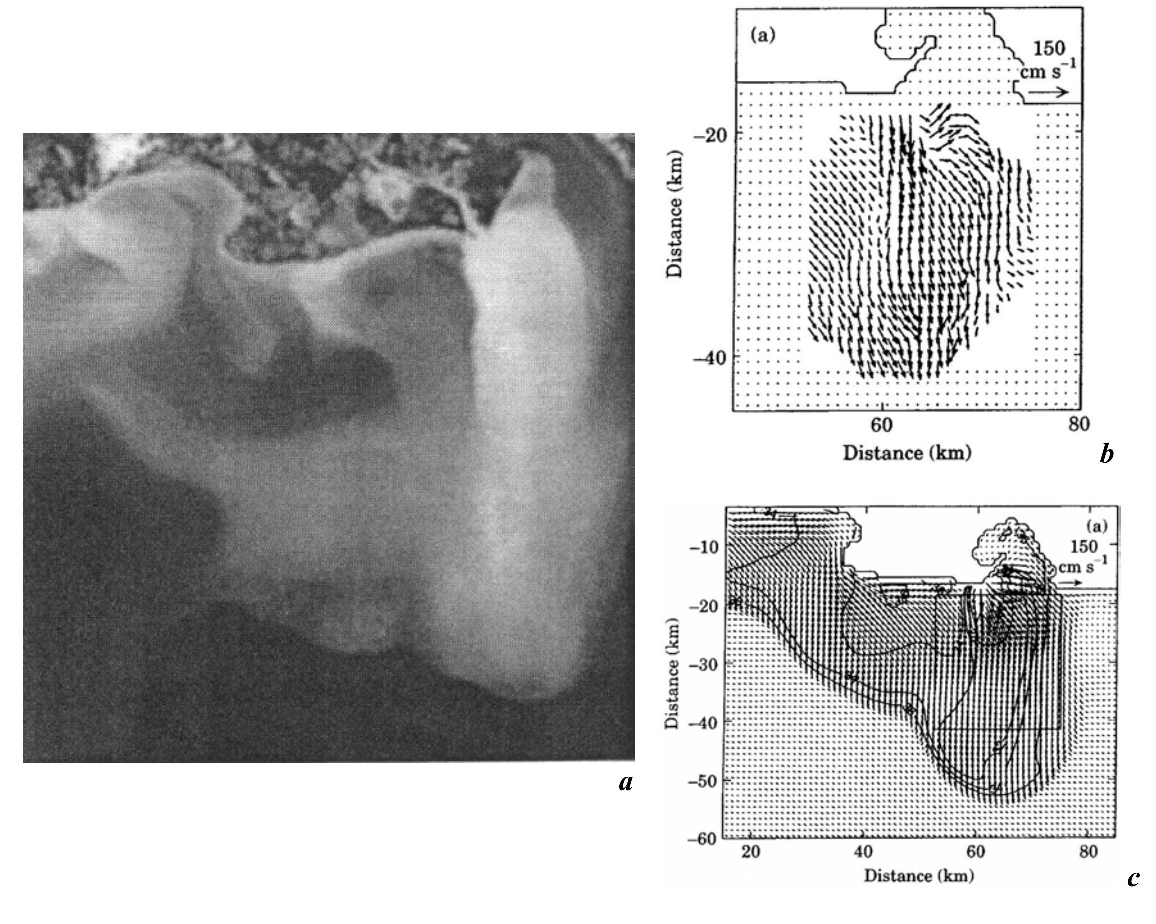


Fig. 4.1 *Le panache du Rhône en proche embouchure le 10 nov. 94 (vent de secteur SE le 9 nov ayant tourné NO dans la nuit du 9 au 10), débit de 3400 m^3/s.*
(a) champ de concentration en MES à 11h dérivé de données SPOT [Ouillon et al. 1997] - cf fig. 3.4.
(b) courants de surface à 12h mesurés par radar VHF [Broche et al. 1998].
(c) courants de surface et isohalines à 12h simulés à l'aide du code Symphonie [Estournel et al. 2001]

La figure 4.1 illustre la complémentarité des outils employés pour mesurer, simuler et *in fine* analyser l'épisode de vent tournant de SE à NO. L'analyse physique des 3 épisodes est présentée par Durand *et al.* (1999 – en annexe), Arnoux-Chiavassa *et al.* (1999) et Estournel *et al.* (2001). Une présentation synthétique de la démarche intégrée associant mesures, télédétection et modélisation numérique sur les panaches du Rhône et de l'Ebre est également jointe en annexe [Arnoux-Chiavassa *et al.* 2000].

<u>Etude intégrée du panache de l'Ebre [Durand *et al.* 2002, Mestres *et al.* 2003]</u>

Les régimes caractéristiques fluvial et climatique à l'embouchure de l'Ebre ont été établis à partir d'une année d'enregistrements et comparés à la bibliographie par Durand dans le cadre de sa thèse. L'étude s'est articulée autour de trois épisodes caractéristiques.

La calibration du modèle a été réalisée sur une situation quasi-stationnaire de vent de Nord-Ouest ("mestral") datant du 6 juillet 1997 (cf fig. 4.2 à 4.5). Cet épisode est intéressant car il s'agit d'une situation récurrente, d'une part, et qu'elle a fait l'objet de nombreuses mesures hydrologiques et optiques sur place le 6 juillet 97 à +/- 2h de la prise d'image SPOT (cf fig 3.6 et 3.7, § 3.2).

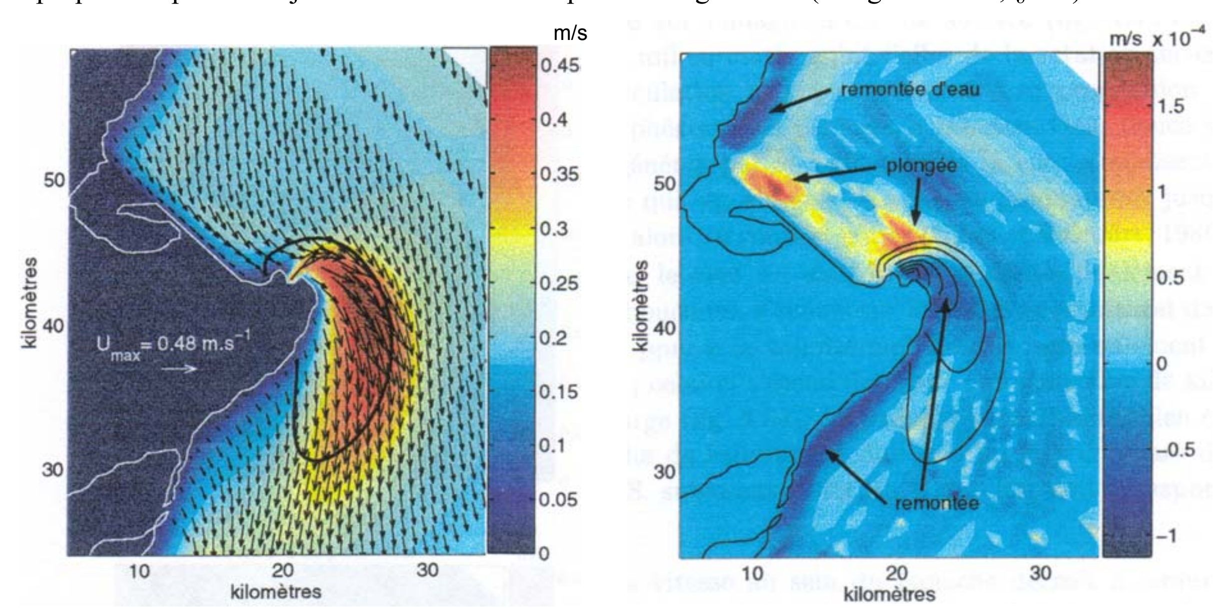


Fig. 4.2 *Courants de surface et isohaline 36.7 le 6 juillet 97 à 11h*

Fig. 4.3 *Vitesse verticale moyenne des courants le 6 juillet 97 à 11h*

Les simulations ont notamment montré que la topographie côtière en coin, qui induit la formation de recirculations tridimensionnelles complexes dues au vent (fig. 4.4), augmente l'interaction entre l'upwelling côtier et le panache fluvial et limite l'influence du courant côtier (fig. 4.3).

La méthode d'inversion satellitale C_{OE} (§ 3.2) a fourni des cartes de concentration en deux couches superposées de la colonne d'eau ; elles ont été comparées aux données numériques intégrées sur les mêmes épaisseurs de fluide. Nous ne disposions cependant pas de données suffisantes, notamment relatives aux tailles de particules, pour aller au-delà d'une comparaison qualitative. La figure 4.5 illustre la sensibilité du modèle à la taille des particules rejetées à l'embouchure.

La validation du modèle hydrodynamique a été menée sur deux situations de débit extrême (crue et étiage) et de vent instationnaire. La comparaison avec les données *in situ* a porté sur des profils verticaux de salinité et le suivi d'une bouée dérivante (ex. fig. 2.10 et 2.11). Le modèle validé a ensuite été appliqué à des situations représentatives et récurrentes à l'échelle annuelle. Les simulations ont permis de proposer une discussion sur l'occurrence des flux d'origine fluviale vers le talus et le domaine hauturier en fonction des influences majeures de vent et de débit.

Fig. 4.4 *Lignes de courant simulées pour la situation du 6 juillet 1997*

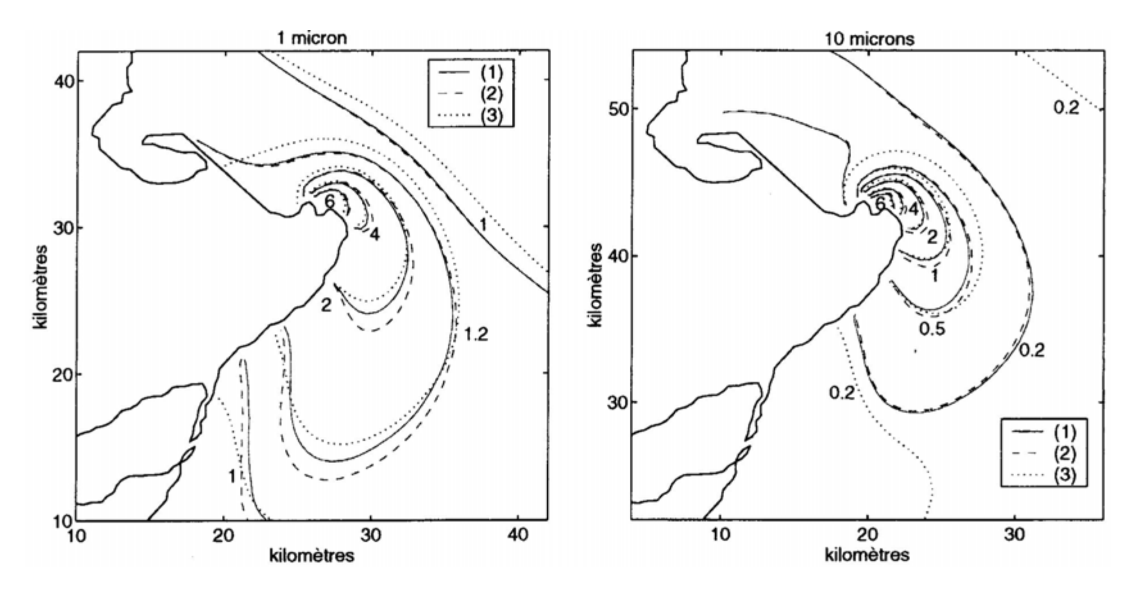


Fig. 4.5 *Lignes d'iso-concentration en MES en surface le 6 juillet 1997 à 11h - Test de sensibilité à la taille des particules*

Une autre étude numérique du panache de l'Ebre a été conduite par une équipe catalane qui a alimenté son analyse avec des données SPOT que nous avions acquises [Mestres *et al.* 2003 en annexe]. Les structures turbides mises en évidence sur l'image SPOT ont été utilisées pour valider qualitativement les structures halines calculées par le modèle.

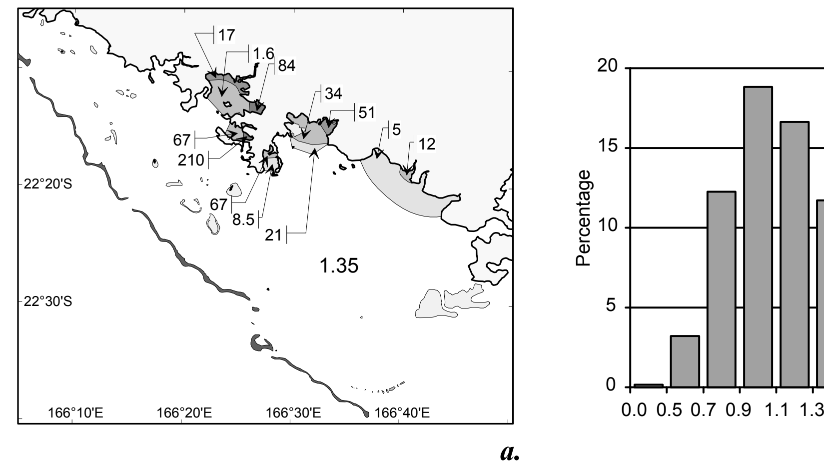
Citations de Durand et al. (2002) : Galofré *et al.* (2002), Salat *et al.* (2002), Xing et Davies (2002), Maidana *et al.* (2002), Jones (2002)

Calibration du modèle de transport dans le lagon par télédétection [Ouillon *et al.* 2004]

Le modèle de transport de vases implanté sur le lagon de Nouvelle-Calédonie avait été testé dans des conditions de forçage schématiques et avec un jeu de paramètres globaux dans Douillet *et al.* (2001). Nous avons ensuite testé ce modèle en situation réelle.

En septembre-octobre 2002, des campagnes de mesures physiques (turbidité) et optiques (réflectance de surface) simultanées se sont déroulées tous les 16 jours lors des passages du satellite Landsat 7. Nous avions alors demandé aux programmeurs de Landsat 7 d'enregistrer systématiquement les données acquises par le satellite sur la Nouvelle-Calédonie. Les données acquises le 23 octobre, de bonne qualité, ont été retenues pour la calibration du modèle de transport. Une carte de turbidité issue des données Landsat (voir détails de l'inversion § 3.2) a été utilisée avec les mesures *in situ* pour ajuster, par zones au sein du lagon, l'érodabilité des fonds qui est un paramètre essentiel du modèle et qui, étant donnée la forte hétérogénéité des fonds lagonaires, ne pouvait être définie que localement (fig. 4.6a). Rappelons que l'estimation de la turbidité à partir de l'image et de la loi d'inversion que nous avions établi présente une bonne précision puisque l'erreur moyenne dans la détermination de la turbidité est de 17.5 % pour les eaux dont la profondeur est supérieure à 14 m, ou supérieure à 10.5 m lorsque la turbidité est supérieure à 1 FTU.

La simulation numérique de la circulation et du transport a été conduite sur l'ensemble du mois d'octobre 2002. Le modèle de transport a été appliqué à la population caractéristique de particules fines (diamètre moyen de 7 µm) en adoptant les contraintes-seuils de dépôt et d'érosion déterminés en situation de forçage typique [Douillet *et al.* 2001].



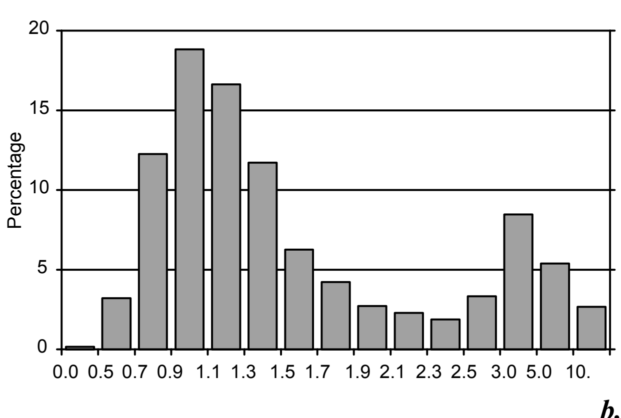


Fig. 4.6 *Calibration de l'érodabilité dans le lagon par optimisation à partir des données d'octobre 2002. (a) valeur de l'érodabilité ajustée par zone par rapport à un taux d'érosion uniforme* k_{ec} *de 7.5* 10^{-5} $g.m^{-2}.s^{-1}$*. (b) histogramme du rapport "turbidité Landsat 7/ concentration en MES modélisée" pour le 23 octobre 2002 à 9h39, heure locale, sur tout le domaine commun à l'image et au modèle. L'axe vertical indique le pourcentage de points dans chaque classe. Les points dont le rapport est supérieur à 2 correspondent essentiellement à des zones peu profondes sur lesquelles l'inversion de Landsat 7 est déficiente, la réflexion solaire sur les fonds n'ayant pas été corrigée lors de cette étude.*

La distribution du taux d'érosion pour les vases fines responsables de la turbidité a été estimée par une méthode d'optimisation par moindres carrés entre simulations numériques et données spatiales

de manière à ce que (1) les profils de turbidité simulés soient le plus proche possible des profils mesurés en mer et (2) la distribution de la concentration calculée par le modèle soit proche du champ de turbidité issu des données Landsat (fig. 4.6b). La distribution qui en résulte conduit à des valeurs du taux d'érosion plus importantes dans les baies et près des embouchures que dans la partie centrale du lagon (fig. 4.6a).

Validation du modèle de transport, Analyse de l'érodabilité en fonction des caractéristiques sédimentologiques [Ouillon *et al.* en préparation pour *Continental Shelf Research*]

Faisant suite à la calibration numérique de l'érodabilité, déterminée par optimisation purement numérique entre les champs de turbidité mesurés et simulés pour oct. 2002, il apparaît opportun d'étudier les corrélations entre la distribution résultante du taux d'érosion et certaines caractéristiques sédimentologiques (origine des particules, taux de vases, indice de dureté fournie par sondeur acoustique). Nous avons abordé cette question suivant 3 angles :

1. Des données acquises en septembre 2000, comprenant profils de turbidité et une carte de turbidité issue de données Landsat, ont d'abord été employées pour valider la distribution d'érodabilité.

2. Nous avons ensuite étudié les corrélations entre les taux d'érosion et certains paramètres sédimentologiques locaux déterminés par C. Chevillon.

3. Enfin, la variation de turbidité en 2 points durant 24h a été analysée en détail, à partir de mesures et du modèle, afin de mieux comprendre le fonctionnement du lagon et de focaliser notre attention sur les points et zones qui apparaissent sensibles pour les études ultérieures. Cette troisième partie avait démarré durant le stage de DEA de B. Bouron-Morin au cours duquel le modèle de transport de vases avait été confronté aux mesures de turbidité effectuées en septembre 2000.

A titre d'exemple, la figure 4.7 présente le taux de carbonate dans le sédiment superficiel, c'est-à-dire le pourcentage de particules biogènes. La zonation du taux d'érosion (fig. 4.6a) présente une remarquable similitude de formes et de gradient avec le pourcentage de particules terrigènes que l'on peut déduire de la figure 4.7. L'analyse comparée de la distribution du taux d'érosion avec d'autres paramètres (ex: diamètre sédimentologique moyen) n'a pas été probante. Nous suggérons donc que, à taille équivalente, les particules fines terrigènes sont remises en suspension plus aisément que les particules carbonatées. Une série de mesures *in situ* par érodimètre serait utile pour distinguer les seuils de remise en suspension pour les deux types de particules, qui sont supposés égaux dans notre étude. Ce travail est une étape supplémentaire dans la modélisation du transport de particules fines testée sur une classe de taille, en attendant de connaître la distribution de tailles effective dans la colonne d'eau.

L'impact d'un vent variable sur la contrainte de cisaillement au fond et sur les épisodes d'érosion et de dépôt est présenté en fig. 4.8 pour une station lagonaire profonde (30 m) pour une séquence de 4 jours en septembre 2000. La direction du vent est voisine de la direction de propagation de la marée. Lorsque le vent est supérieur à 5 m/s (24 et 27/9), il ne se produit qu'un épisode d'érosion par cycle de marée, relativement fort. En revanche, par vent faible (25 et 26/9), il se produit deux cycles d'érosion de plus faible amplitude par cycle, l'un à marée montante, l'autre à marée descendante. La remise en suspension de sable (diamètre considéré dans l'exemple : 100 µm) ne se produit en ce point que pour des vents forts.

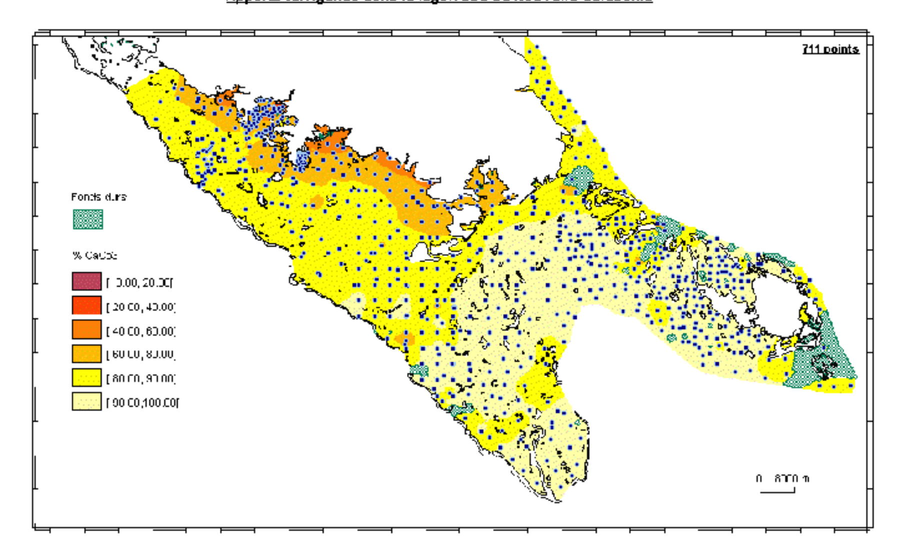


Fig. 4.7 Pourcentage de carbonate dans le sédiment superficiel [Chevillon, comm. personnelle]

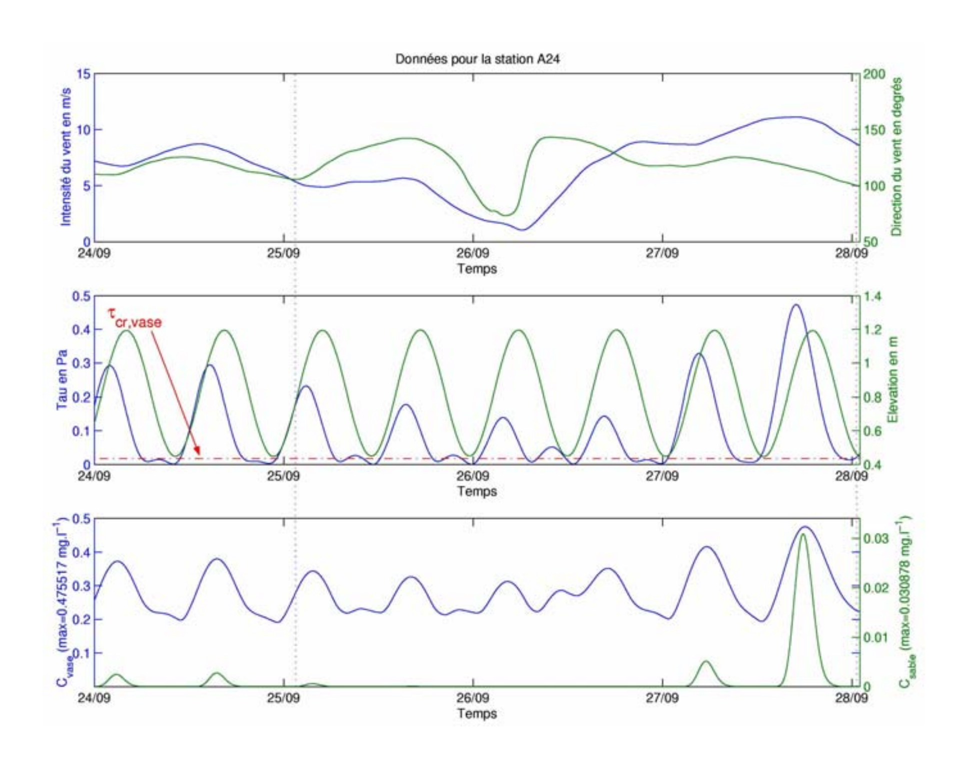


Fig. 4.8 *Variation sur 4 jours du vent (en haut), de l'élévation de la mer et de la contrainte de cisaillement au fond (au milieu), et des concentrations en vase et en sable calculées près du fond (en bas) pour une station lagonaire profonde (30 m)*

Les processus physiques qui régissent les échanges particulaires aux interfaces sont encore assez mal connus, et les modèles font largement appel à l'empirisme et à la paramétrisation. Depuis quinze ans, je suis persuadé que l'approche intégratrice de la dynamique particulaire qui met en œuvre conjointement modèles, mesures *in situ* et données spatiales est une voie privilégiée qui permettra, lorsque les synergies seront suffisamment développées, d'affiner les modèles et ainsi d'aller au-delà dans la compréhension des processus. Cette approche ne se substitue pas aux études classiques de

processus, elle les complète et participe même aux études de processus. L'analyse de l'érodabilité des fonds déterminée numériquement en regard des données sédimentologiques en est un exemple significatif.

Analyse des variations saisonnières et interannuelles des paramètres physique (température, salinité, turbidité) du lagon [Douillet *et al.* soumis, Ouillon *et al.* en préparation pour *Marine Geology*]

Dans le Pacifique sud-ouest entourant la Nouvelle-Calédonie, le signal ENSO (El Niño Southern Oscillation) modifie sensiblement la distribution saisonnière des paramètres physico-chimiques de l'océan. Pour en étudier l'influence au sein du lagon, distinguer les variations saisonnières des variations interannuelles de ces paramètres et décrire globalement le fonctionnement physico-chimique du lagon, 22 campagnes de mesures de salinité, température et turbidité réalisées à l'aide d'une sonde CTD pendant la période 1997-2001 ont été analysées [Douillet *et al.* soumis à *Coral Reefs*, Ouillon *et al.* en préparation]. Nous en reprenons ici les principales conclusions.

Gouriou et Delcroix (2002) ont montré que les anomalies de salinité dues à ENSO dans l'environnement océanique de la Nouvelle-Calédonie sont deux fois plus importantes que les variations saisonnières. L'analyse des 22 campagnes montre que les variations de salinité de surface dans le milieu du lagon sont cohérentes avec les variations de salinité à méso-échelle. Après l'épisode El Niño de 1997-98, la décroissance de la salinité de surface commence début 1999, en retard de 10 mois sur les variations de l'Indice d'Oscillation Australe (SOI ou "South-Oscillation Index") et en accord avec les variations régionales. La salinité moyenne dans le lagon est inférieure de 0.2 en 1999 par rapport à l'année précédente, en accord avec l'anomalie de -0.15 estimée par Gouriou et Delcroix (2002) en milieu océanique. Au sein du lagon et plus spécifiquement au voisinage des côtes, la salinité de surface est fortement influencée par les conséquences météorologiques et hydrologiques d'ENSO. Durant un évènement El Niño, les apports en eau douce sont faibles sur la Nouvelle-Calédonie, l'évaporation est accrue par des vents plus forts et une moindre couverture nuageuse, les baies côtières, moins profondes, sont donc plus salées que le milieu du lagon. Durant un épisode La Niña, les apports en eau douce augmentent, l'évaporation diminue, ce qui induit dans les zones côtières des salinités inférieures à celle du milieu de lagon. La salinité dans le lagon varie donc de la même manière qu'à l'échelle régionale en amplifiant ses variations sous l'influence d'ENSO.

Les variations saisonnières de la température de surface dans le lagon sont bien supérieures à leurs variations interannuelles. La distribution spatiale de température présente un gradient côte-large qui s'inverse saisonnièrement. La température est plus grande (resp. plus basse) dans les baies et près de la côte que dans le lagon pendant l'été (resp. l'hiver). A partir d'une série de mesures effectuée à long terme (1977-2001), nous avons également montré l'existence de variations interannuelles. La température minimale du lagon est supérieure durant l'hiver austral qui suit un épisode El Niño aux autres hivers. De manière globale, les variations de température dans le lagon suivent les variations de température à l'extérieur du lagon et les amplifient.

Une stratification thermique apparaît dans le lagon durant la saison chaude et relativement sèche d'Octobre à Décembre, alors qu'une stratification haline est observée durant la saison humide de Janvier à Avril. L'existence de stratification haline durant les saisons intermédiaires ou fraîches dépend des apports par les rivières et est plus commune en période La Niña. La stratification haline, lorsqu'elle est présente, se limite à une frange côtière. Durant les stratifications thermiques d'été, la thermocline n'atteint jamais le fond dans les parties les plus profondes du lagon tandis que la colonne d'eau, réchauffée entièrement dans les zones peu profondes, est plus homogène. De ce fait, la température est plus homogène en surface qu'au fond du lagon.

La distribution spatiale de turbidité résulte de l'action des courants induits par la marée et par le vent, de l'influence des vagues par petits fonds et des apports par les rivières. En dehors des tempêtes, la dynamique particulaire est contrainte par la remise en suspension des particules, leur transport et leur dépôt. Des fortes variations de turbidité sont observées à court terme et sur de courtes distances. Elles s'expliquent par les phénomènes météorologiques et hydrologiques

climatiques mais aussi par les fortes variations de la bathymétrie, de la topographie et de la nature des fonds. La variabilité interannuelle de turbidité se traduit à la fois sur le niveau moyen de turbidité, très sensible à l'occurrence des crues, et sur la distribution verticale de turbidité. Les apports de sédiments par les rivières sont accrus en période La Niña ou neutre, la stratification en turbidité augmente en période La Niña (fig. 4.9). La remise en suspension, qui organise le faciès sédimentaire, est en revanche accrue par les vents plus forts en période El Niño.

Connaître les variations interannuelles de T, S et de la turbidité au sein du lagon sera en particulier utile dans l'analyse des critères favorables au blanchissement de coraux ou à l'apparition de blooms phytoplanctoniques.

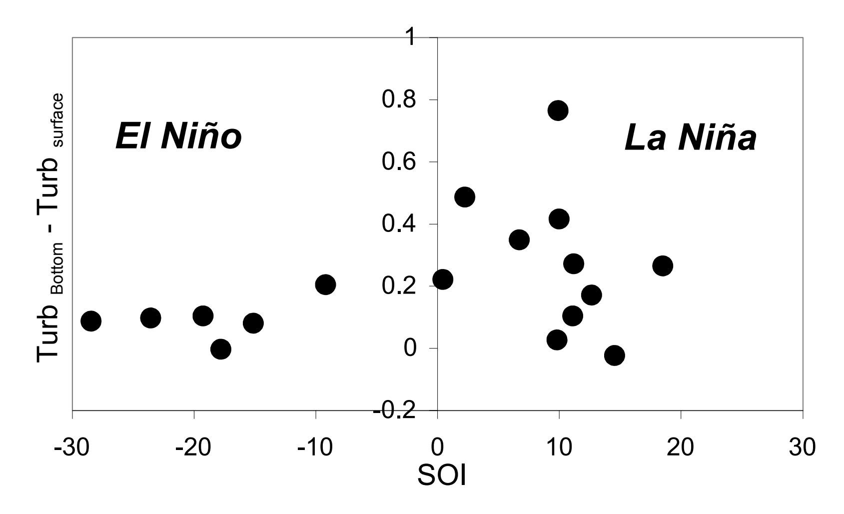


Fig. 4.9 *Différence entre turbidité de fond et turbidité de surface moyennées sur la zone sud du lagon sud-ouest en fonction de l'indice d'oscillation australe (SOI).*

5. Projet de recherche : Dynamique particulaire en zone intertropicale

5.1 Introduction

Spécificités des zones côtières intertropicales

La dynamique particulaire dans les eaux côtières tropicales connaît de nombreuses singularités qui nécessitent plus qu'une simple transposition des outils, méthodes et analyses existant en zones tempérées et qui demandent à ce que des travaux de recherche spécifiques soient soutenus.

La climatologie en milieu tropical se distingue nettement de la climatologie en milieu tempéré et agit sur la nature des particules et les volumes transportés. La décomposition physico-chimique des roches, qui génère les apports terrigènes "naturels", augmente avec l'humidité et la température. Les îles hautes de la ceinture tropicale présentent un relief marqué avec des pentes plus fortes que dans la plupart des zones côtières tempérées [Bird et Hopley 1969]. Le potentiel érosif des précipitations est donc plus important sur ces reliefs. La modification du couvert végétal induite par les activités humaines peut accroître les taux d'érosion des sols de plusieurs ordres de grandeur [Hopley *et al.* 1993], d'où la vigilance nécessaire en matière d'érosion. A titre d'exemple, les apports particulaires ont été multipliés par 5 à 10 sur la Grande Barrière de Corail depuis 1870 sous l'effet des activités humaines [McCulloch *et al.* 2003]. Les différences climatiques et météorologiques des milieux tropicaux se traduisent également par des forçages caractéristiques qu'il faut prendre en compte dans l'étude et dans l'analyse de la dynamique particulaire en zones côtières : alternance d'une saison sèche et d'une saison humide, pluviométrie très irrégulière avec évènements paroxystiques (pluies cycloniques), alizés, cyclones, moussons dans l'Océan Indien, influence marquée d'ENSO dans le Pacifique, présence de houles parfois longues (Pacifique)…

La nature même des populations de particules en suspension n'est pas la même dans les eaux côtières tropicales et en milieux tempérés. En zones tropicales, les roches meubles d'origine terrigène sont mélangées aux particules carbonatées d'origine biogène (ou bioclastes), débris de coraux ou d'autres organismes calcaires comme certaines algues (*haliméda*, maërl), des mollusques et des foraminifères. Les propriétés physico-chimiques des particules terrigènes et marines sont très différentes : alors que les roches ont une masse volumique proche de 2650 kg/m^3, les particules biogènes ont des masses volumiques très variables suivant leur origine, qui peuvent atteindre la valeur de 1090 kg/m^3 [Yamano *et al.* 2002] ; les particules biogènes se lithifient plus rapidement que les particules terrigènes et peuvent former des substrats durs (dalles calcaires ou hardgrounds) sur de grandes étendues, limitant ainsi localement l'érosion ; les vases carbonatées sont également plus compactes et moins fluides que les vases terrigènes [Chevillon 1996, Ouillon *et al.* 2004].

De manière générale, l'activité biologique est très riche en zone côtière intertropicale et révèle une forte biodiversité, particulièrement remarquable dans les récifs coralliens et dans les mangroves. La ligne de couverture côtière est occupée à 75% par les mangroves, qui jouent sur le plan physique un rôle primordial de filtre, protègent les côtes de l'agression de la houle et piègent les particules, limitant ainsi la turbidité des eaux s'acheminant vers les lagons. Les récifs coralliens se développent préférentiellement dans les eaux claires, oligotrophes, sur des substrats durs. Les particules en suspension ont des effets inhibiteurs ou négatifs sur les communautés récifales, du fait notamment de leur pouvoir abrasif et de la diminution de pénétration lumineuse qu'elles induisent [Rogers 1990, McLaughlin *et al.* 2003, Cole 2003]. L'activité biologique benthique, également très abondante, modifie significativement les conditions de remise en suspension ou de rétention des particules : présence d'herbiers, d'algues, de tapis cyanobactériens, de sédiments mixtes terrigènes et biogènes, bioturbation [Yahel *et al.* 2002]. Les plages de sable mises à part - qui constituent partout des habitats pauvres et recèlent des biotopes réduits -, les interactions entre les organismes vivants

(plantes ou animaux) et les systèmes physiques sont beaucoup plus marquées en milieu tropical qu'en milieu tempéré [Woodroffe 2000].

Du fait de cette forte interaction entre transport particulaire et biotopes en zone tropicale, les écosystèmes sont également plus sensibles à tout changement d'origine anthropique, et plus vulnérables [Smith et Buddenmeier 1992]. La présence d'une activité biologique accrue est un facteur de sur-exposition aux activités humaines (pêche, tourisme) qui peuvent avoir un effet sur leur équilibre dynamique [Hodgson 1999]. Les variations des flux sédimentaires et des bilans particulaires sont ainsi largement contraintes par les activités humaines soit directement soit indirectement du fait de leur influence sur l'équilibre de l'écosystème.

Objectifs et Contexte

Dans ce contexte, la recherche concernant la dynamique particulaire en milieu côtier tropical et ses interactions avec les activités humaines doit s'appuyer sur des études de processus dont certains sont spécifiques à ce milieu. Les travaux que je propose d'engager dans le cadre de mon projet de recherche s'inscrivent dans cette logique. Ils visent à **améliorer nos connaissances des mécanismes de transport, de remise en suspension et de dépôt de particules dans les eaux côtières en zone intertropicale pour augmenter nos capacités à les simuler et pour estimer avec plus de précision les flux particulaires**. Ils doivent également permettre la mise en place d'outils de surveillance et d'analyse dans le cadre de l'océanographie opérationnelle.

Les premiers sites d'application de ce projet sont les deux sites d'étude de l'UR CAMELIA, à savoir le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie et le lagon de Suva à Fidji. L'UR CAMELIA a pour objectif principal de quantifier l'influence anthropique, notamment du fait des activités minières, sur des écosystèmes littoraux du Pacifique. La Nouvelle Calédonie est au 4ème rang des pays producteurs de nickel. Deux nouvelles usines importantes doivent être prochainement implantées. L'accroissement attendu de la turbidité [Thomas *et al.* 2003] et des apports métalliques dans le lagon aura à long terme des conséquences sur la biologie des organismes vivants dans le lagon, comme les coraux [Alibert *et al.* 2003] et les poissons. L'équipe réunie au sein de l'UR CAMELIA est une équipe multidisciplinaire (biogéochimie, biologie, microbiologie, chimie, hydrodynamique, sédimentologie) à laquelle j'apporte mon concours dans le domaine de la dynamique particulaire et c'est donc en toute logique que mon souhait est de poursuivre les travaux engagés au sein de cette équipe ou en étroite collaboration avec elle.

Approche et Méthode de travail

Hormis les études de processus isolés, l'étude du transport particulaire en milieu naturel nécessite bien évidemment le déploiement d'instruments de mesure hydro-sédimentaires pour caractériser les particules en présence et analyser les processus localement dominants. Cependant, on ne peut, pour des raisons budgétaires, multiplier les instruments *in situ*, et les campagnes de mesure depuis un navire fournissent une distribution de variables qui n'est ni réellement synoptique ni réellement instantanée, ce qui rend parfois difficile l'interprétation des données. La télédétection spatiale visible donne accès à des champs instantanés (par ex. de concentration en MES), mais ceux-ci se réduisent à une couche de quelques mètres d'épaisseur sous la surface et ce, en l'absence de nuages, ce qui exclut par exemple les épisodes de tempête où le remaniement sédimentaire est très important. La modélisation numérique permet *a priori* de calculer des champs 3D de concentrations en MES, mais connaît encore des limites importantes du fait de notre méconnaissance de nombreux processus relatifs à l'hydrodynamique et aux interactions hydrodynamique-particules (érosion, floculation, influence du phytobenthos, influence des mélanges de sables et de vase).

L'étude de processus constitue donc le socle sur lequel sont bâtis les modèles. Mon projet se focalise essentiellement sur les processus caractéristiques des zones côtières coralliennes sous influences terrigènes et anthropiques. Les processus impliqués, extrêmement divers et qui sont détaillés plus bas, font appel à des spécialistes de disciplines aussi variées que la dynamique des fluides géophysiques (courants, marée, vagues, turbulence, circulation atmosphérique), la météorologie, les

aérosols, l'optique marine, la sédimentologie, l'hydrologie, le calcul numérique ou la radiochimie ; c'est pourquoi le partenariat correspondant à chaque volet du projet est également présenté.

Une application attendue des études de processus que je propose sera par conséquent l'amélioration récurrente de la modélisation hydro-sédimentaire et la poursuite de la calibration d'un modèle 3D sur les sites d'étude de l'UR CAMELIA. Un modèle calibré constitue en effet le meilleur support à la compréhension, à l'interprétation et à la quantification du transport particulaire global pour un site donné. Il permet des études de sensibilité et le test de nouvelles formulations pour rendre compte des processus de forçage. Pour disposer d'un tel modèle, il faut au préalable mettre en place un ensemble cohérent de sous-modèles appelés à être couplés (marée, courant, vagues, turbulence, transport de vase, transport de sable, voire circulation atmosphérique), puis calibrer ces modèles - notamment pour le transport particulaire- c'est-à-dire adapter certains coefficients qui ne peuvent être définis que localement et ponctuellement. Les mesures de terrain sont alors employées pour déterminer préférentiellement des coefficients intervenant dans la distribution verticale des variables (e.g. diffusion turbulente, concentration) à un nombre réduit de stations, tandis que les mesures spatiales synoptiques sont utilisées en complément pour déterminer les variations horizontales de certains de ces coefficients (e.g. taux d'érosion, cisaillement critique).

L'approche intégrée du transport particulaire qui fait intervenir à la fois études de processus, mesures de terrain, observations et simulations n'en est qu'à son balbutiement. Elle nécessite des connaissances et compétences dans des domaines multiples et ne peut de ce fait se développer que dans le cadre de collaborations pluridisciplinaires.

Le projet que je propose s'organise suivant trois volets complémentaires : "Etudes de processus", "Méthodes et Outils" et "Applications et Analyses".

5.2 Etudes de processus

Les processus qui conditionnent fortement la distribution des particules en eaux côtières et qui sont mal connus feront l'objet de recherches spécifiques en collaboration avec des équipes universitaires, du CNRS et de l'Ifremer. Certains de ces processus sont spécifiques aux milieux coralliens. Dans le cadre de ce projet, nous aborderons ainsi au cours des 4 prochaines années :

1. la quantification des apports océaniques par-dessus la barrière récifale dans les lagons (îles hautes et atolls) et l'impact de ces apports sur la sédimentologie d'arrière-récif ;
2. les conditions de remise en suspension et la quantification des flux d'érosion en fonction du substrat et du sédiment superficiel en milieux coralliens ;
3. l'influence des vagues de vent sur les flux particulaires en zone de fond ;
4. l'analyse du temps de résidence des particules dans l'eau, en lien avec les mesures radiochimiques;
5. l'impact de la stratification thermique et/ou haline sur la turbulence, sur les échanges verticaux et donc sur la distribution de particules dans la colonne d'eau ; et
6. la caractérisation des apports particulaires éoliens à la zone côtière.

Cette liste n'est pas exhaustive. Il ne s'agit pas pour moi de développer seul les recherches sur ces sujets mais de mettre en place ponctuellement, pour chacun des processus ciblé, une ou plusieurs collaborations françaises ou internationales qui me paraissent pertinentes, de participer aux recherches et de coordonner les différents partenariats mis en oeuvre. Quatre des six études de processus présentées ci-dessous ont été intégrées en février 2004 à la réponse à l'appel d'offres du Programme National Environnement Côtier (PNEC) pour la période 2004-2007, Chantier Nouvelle-Calédonie, rédigée sous l'égide de J.P. Torréton (IRD) et C. Grenz (COM).

Influence océanique à travers la barrière récifale

Collaborations : P. Bonneton, DGO, Univ. Bordeaux 1; L. Schmied, LSEET-LEPI, Univ. Sud Toulon-Var; S. Andréfouët, UR COREUS, IRD Nouméa; P. Douillet & A. Jouon, UR CAMELIA, IRD Nouméa + Partenaires du projet MOM en cours dont E. Deleersnijder, Univ. Catho. Louvain.

L'hydrodynamique côtière est principalement contrainte par la marée, le vent, et le cas échéant par la houle du large lorsque celle-ci pénètre *pro parte* dans les lagons. L'influence de l'océan sur le lagon via le récif-barrière est cependant encore mal connue. Jusqu'à présent, la modélisation hydrodynamique développée et appliquée sur le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie s'appuie sur une description schématique de la limite entre le lagon et l'océan, l'essentiel des échanges se produisant au niveau des passes, et l'influence de la houle du large n'est pas prise en compte au niveau du récif-barrière. En réalité, la houle qui déferle sur la barrière constitue une source d'eau océanique pour le lagon qu'il convient de caractériser et de quantifier suivant deux aspects : les apports d'eaux, d'une part, et la sur-élévation du plan d'eau derrière la zone de déferlement (le « set-up »), d'autre part, qui est susceptible de générer une circulation des masses d'eau le long du récif à l'intérieur du lagon. Cette sur-élévation pourrait avoisiner 20 % de la hauteur significative de la houle incidente [Tait 1972].

Nous proposons de mettre en place en 2005 des instruments de mesure à haute et basse fréquences sur une portion-test du récif-barrière de Nouvelle-Calédonie (courantomètres, capteurs de pression) sur une durée suffisamment longue pour capter des trains de houle de hauteurs différentes.

Dans une première approche, les courants mesurés sur la barrière seront analysés en fonction de la houle (altimétrie par Topex) et du vent (mesure locale et/ou données altimétriques) pour étudier le débit linéique généré par des houles de hauteur et direction variables en s'appuyant sur la méthode testée par Andréfouët *et al.* (2001) sur des atolls. Cette approche globale permettra de valider ou de compléter les modèles proposés par Symonds *et al.* (1995) ainsi que par Tartinville et Rancher (2000). Une généralisation à l'ensemble du récif-barrière permettra alors d'estimer, en utilisant les données de houle par altimétrie, les flux totaux générés par la houle dans le lagon sud-ouest. L'introduction de la modélisation de ces flux dans le modèle hydro-sédimentaire 3D du lagon sud-ouest sera alors envisagée.

Pour compléter l'approche globale, une étude des processus de transformation de la houle sur le récif sera conduite. En effet, si l'on connaît assez bien les processus de déferlement bathymétrique sur des plages en pente douce en revanche on connaît mal ce phénomène lorsqu'il se produit sur de très fortes pentes comme celles des récifs coralliens. En s'appuyant sur des résultats expérimentaux antérieurs [Young 1989, Gourlay 1996], sur les approches analytiques récentes [Hearn 1999, Hearn *et al.* 2001, Massel et Gourlay 2000] ainsi que sur nos mesures haute fréquence, nous proposons de développer un modèle décrivant la transformation des vagues sur le récif, ainsi que le "set-up" et l'apport d'eau dans le lagon qui en résulte. On s'intéressera aussi à l'influence des ondes de groupe sur le phénomène de "set-up". La caractérisation de la houle extérieure bénéficiera de l'analyse de données de télédétection (S. Andréfouët) et de données météorologiques (Météo-France). L'étude s'échelonnera sur la période 2005-2007. Elle débouchera notamment sur l'étude de l'impact des apports océaniques sur la sédimentologie des zones d'arrière-récif (2006-2007).

Une étude similaire sur un atoll polynésien sera entreprise dans le cadre d'un projet financé par le MOM qui démarre en août 2004 (cf p. 2).

Couverture benthique, Sédiments superficiels et Taux d'érosion

Collaborations : C. Chevillon (caractérisation des substrats), UR CAMELIA; C. Payri (couvert algal), Univ. Polynésie Française, Tahiti; S. Andréfouët (mesures spatiales), UR COREUS, IRD Nouméa; P. Le Hir (mesure in situ de l'érodabilité), Ifremer Brest; P. Douillet (station benthique), UR CAMELIA.

L'érodabilité des fonds superficiels dépend de multiples paramètres parmi lesquels la nature et la consolidation des sédiments superficiels, la porosité, le couvert benthique algal ou bactérien, la présence d'organismes bioturbateurs [Yahel *et al.* 2002]. Nous analyserons en détail ces caractéristiques sur des stations variées et représentatives du lagon, en utilisant notamment une station benthique multi-instrumentée en cours d'acquisition qui dispose déjà d'un courantomètre et de deux turbidimètres. Nous tenterons d'exprimer l'érodabilité des fonds, dont une calibration empirique a été réalisée [Ouillon *et al.* 2004], en fonction de l'origine terrigène ou biogène des particules et à partir de paramètres acoustiques (dureté des fonds fournie par le classificateur hydro-acoustique *RoxAnn®*) et/ou optiques. Cette étude démarrera en 2004.

Influence des vagues de vent sur les flux particulaire en zone de fond

Collaborations : L. Schmied & P. Fraunié, LSEET-LEPI, Univ. Sud Toulon-Var ; P. Douillet & A. Jouon, UR CAMELIA.

Mis à part les apports par les rivières qui ont une importance très épisodique, le principal processus responsable de la turbidité en milieu corallien est la remise en suspension sous l'effet combiné des vagues de vent, des courants générés par la marée et par le vent, et le cas échéant de la houle du large [Larcombe *et al.* 1995, 2001; Orpin *et al.* 1999; Douillet *et al.* 2001]. La génération et la propagation des vagues de vent, notamment pour les lagons ou les atolls dans lesquels la houle du large pénètre peu, ainsi que l'effet combiné des vagues et des courants dans les échanges particulaires au fond, doivent donc faire l'objet d'études approfondies.

Le modèle de génération et de propagation des vagues de vent que nous avons implanté sur le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie (code WAVEWATCH III de la NOAA) a été validé à partir de mesures de vagues non directionnelles. La modification du champ de contraintes de fond induite par les vagues dans le modèle de transport particulaire a été introduite fin 2003 [Bel Madani 2003]. Nous espérons valider cette approche dès 2004 à partir de mesures directionnelles de vagues et de mesures dynamiques resserrées dans la couche limite benthique (ADV Sontek). Une fois le modèle de vagues et son couplage au modèle hydro-sédimentaire validés, il sera possible de quantifier la part des vagues dans les apports énergétiques en zone de fond et dans les épisodes de remise en suspension.

Temps de résidence des particules

Collaborations : R. Szymczak, ANSTO, Sydney; J.M. Fernandez, CEA; P. Douillet & A. Jouon, UR CAMELIA.

Une collaboration sera engagée avec Ron Szymczak (ANSTO, Australie) et Jean-Michel Fernandez (CEA, mis à disposition de l'IRD à partir d'avril 2004), géochimistes, qui utilisent des approches de traçage radiochimique et en particulier le rapport isotopique $^{234}Th/^{238}U$ pour calculer le temps de résidence des particules dans la colonne d'eau et des flux verticaux particulaires. Nous analyserons et testerons sur des cas concrets les méthodes de validation des modèles de transport que l'on peut envisager à partir de leurs résultats.

En 2004 et 2005, la collaboration démarrera sur l'analyse des épisodes de remise en suspension et sur le calcul des temps de résidence de particules dans la colonne d'eau (mesures et modèle). L'utilisation de taux d'érosion mesurés par traceurs radioactifs pour la calibration ou la validation du modèle sera abordée dans une seconde étape en 2005 et 2006.

Impact de la stratification thermo-haline sur les particules - Formation de feuillets dans un fluide stratifié tournant : observations océanographiques

Collaborations : H. Luce & P. Fraunié, LSEET-LEPI, Univ. Sud Toulon Var.

Le lagon de Calédonie est stratifié au moins la moitié de l'année. Les profils verticaux de turbidité mesurés depuis plusieurs années montrent combien l'effet de la stratification en densité, d'origine le plus souvent thermique, est primordiale dans la répartition des particules suivant la verticale, avec des zones d'accumulation parfois très fortes, allant jusqu'à l'apparition de "feuillets" comme on a pu l'observer pour les concentrations en aérosols dans l'atmosphère. Le comportement des particules en milieu stratifié sera l'objet d'une collaboration avec le LSEET qui étudie ce processus sur les plans théorique et instrumental dans l'atmosphère [Luce *et al.* 2002, Leblanc 2003]. Pour démarrer notre étude, nous caractériserons les feuillets observés dans le lagon à partir de profils de température, salinité et turbidité obtenus à haute fréquence, puis nous tenterons d'analyser les critères favorables à leur apparition.

Caractérisation des apports particulaires éoliens en milieux lagonaires

Collaborations : J. Piazzola & G. Tedeschi, LSEET-LEPI, Univ. Sud Toulon-Var.

Les particules d'origine terrigène sont amenées dans les eaux côtières par voie hydrologique ou par voie éolienne. L'apport éolien est estimé à 2.3 % des apports par voie fluviale, en moyenne et sur l'ensemble des zones côtières [Inman et Jenkins 2003]. Ce pourcentage connaît cependant de fortes disparités et peut être beaucoup plus élevé dans les zones intertropicales qui connaissent l'alternance d'une saison sèche et d'une saison humide.

C'est pourquoi il paraît intéressant de pouvoir caractériser et quantifier les apports éoliens en particules en complément des apports par les cours d'eau. Une analyse de ces apports en Nouvelle-Calédonie pourra être initiée en 2005 ou 2006, avec déploiement d'impacteurs et analyses granulométriques.

5.3 Développements méthodologiques et Outils

Modèles numériques, outils d'intégration

Collaborations : P. Douillet & A. Jouon (hydrodynamique, calcul numérique), UR CAMELIA; G. Tedeschi (modélisation atmosphérique) & L. Schmied (vagues), LSEET-LEPI, USTV.

En modélisation, l'objectif à moyen terme est de disposer d'un modèle hydrosédimentaire calibré et validé des sites étudiés (à commencer par le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie), c'est-à-dire qui reproduise avec une bonne fiabilité la circulation des masses d'eau et les champs de vases et sables en suspension sous l'effet des multiples forçages que constituent la marée, le vent, les vagues, les apports fluviaux et, le cas échéant, la circulation générale. Le modèle hydrodynamique 3D validé sur le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie, développé par P. Douillet en partenariat avec la DEL-AO de l'Ifremer, est à la base du modèle de transport particulaire. Le modèle hydrodynamique évoluera encore puisque P. Douillet remplacera courant 2004 le modèle qu'il avait développé par une version récente de MARS3D en partenariat avec des chercheurs de l'Ifremer (F. Dumas, P. Lazure, P. Garreau). Ce modèle comprend notamment des modèles de turbulence de type k-l ou k-ε, plus adapté que le modèle de longueur de mélange jusqu'à présent opérationnel, et des modules permettant de calculer l'âge des masses d'eau. En parallèle, concernant plus spécifiquement le transport particulaire, nous travaillerons sur les points suivants :

- Poursuite de la calibration et de la validation des modèles de transport de particules cohésives (vases) et non cohésives (sables) sur la base de séries de mesures (ex : ajustement des contraintes-seuil de dépôt et d'érosion par zones).
- Implémentation à moyen terme dans le modèle hydrosédimentaire de la modélisation de certains processus non encore intégrés telle et la présence de sédiments mixtes (interactions

sable-vase, masquage) sur le fond.

- Il sera également important de définir une représentation réaliste multiclasses d'une granulométrie étendue sur la base de mesures (achat d'un granulomètre laser *in situ* en 2004).

La variabilité spatio-temporelle du vent qui est étroitement dépendante de la complexité géomorphologique de la côte (découpage, relief) constitue un forçage essentiel en océanographie côtière. Cette règle est encore plus évidente en Nouvelle-Calédonie où le relief abrupt peut modifier localement le régime de vent. Le couplage du modèle de circulation côtière à un modèle météorologique local devrait donc permettre de faire largement progresser la précision du modèle dans les zones les plus proches de la côte et donc les plus exposés aux apports terrigènes et anthropiques. Nous utiliserons pour cela le code RAMS (Regional Atmospheric Modeling System), développé à l'Université du Colorado à Boulder. Ce modèle doit permettre de calculer un champ de vent réaliste à 10 m d'altitude qui sera utilisé par le modèle hydrodynamique et par le modèle de vagues. Cette activité démarre en 2004 en collaboration avec Gilles Tedeschi, spécialiste de modélisation atmosphérique, dans le cadre du stage de DEA de Yasmine Benounna.

Télédétection

Collaborations : S. Andréfouët, UR COREUS, IRD Nouméa; C. Dupouy, UMR LODYC, IRD Nouméa; C. Chevillon, UR CAMELIA; J.M. Froidefond, DGO UMR EPOC, Univ. Bordeaux 1; A. Petrenko, COM, Univ. Marseille 2; J. Neveux, Obs. Océan. Banyuls + Partenaires australiens, américains et canadiens du projet NASA en cours.

Les applications de la télédétection visible aux eaux côtières sont encore largement empiriques. La recherche en ce domaine concerne donc autant les méthodes (quels paramètres peut-on estimer à partir de données hyperspectrales et comment ? avec quelle précision et quelle fiabilité ?) que l'analyse des signatures optiques élémentaires. Des développements méthodologiques sont notamment nécessaires pour améliorer l'inversion des images en eaux peu profondes, lorsque la signature des fonds se superpose à celles des composants optiquement actifs dans la colonne d'eau. L'enjeu de cette interprétation est important puisqu'il concerne les applications littorales et côtières de la télédétection et cet enjeu est particulièrement d'actualité à l'heure où de nouveaux capteurs satellitaires multispectraux sont déployés, tel MERIS/ENVISAT aux résolutions radiométrique et spatiale bien adaptées à l'étude des zones côtières. La multiplicité des canaux va permettre de quantifier avec une précision accrue des paramètres de qualité d'eau comme la concentration en MES à plusieurs profondeurs sous la surface. Nous souhaitons affiner l'estimation des concentrations en MES à partir de données spatiales multispectrales à l'instar des objectifs de la NASA concernant l'inversion des données SeaWiFS en chlorophylle (incertitude inférieure à 30 %). Sur les fonds très peu profonds, nous envisageons également d'appliquer des classifications supervisées aux images pour déterminer des paramètres intéressant la modélisation du transport particulaire (pourcentage des sables et vases sur les fonds superficiels, couverture des algues et herbiers).

Dans ce contexte, et à la suite d'une étude de faisabilité que j'ai réalisée en 2001 (projet ID-ROM financé par l'ACI 'Observation de la Terre'), j'ai proposé en 2002 à cette même ACI un projet de recherche élargi à l'analyse des signatures hyperspectrales en milieux côtiers. Le projet BISSECOTE, que je coordonne et auquel l'ACI 'Observation de la Terre' a attribué 68 k€, concerne l'identification par télédétection hyperspectrale des fonds meubles et des substances en suspension ou dissoutes en eaux côtières peu turbides. Il regroupe des chercheurs issus de 10 laboratoires. Nos objectifs sont doubles à travers ce projet : 1) améliorer la discrimination minéralogique et biologique dans la colonne d'eau et sur les petits fonds en eaux côtières peu profondes ; 2) améliorer les algorithmes de quantification des substances en suspension ou dissoutes en eaux côtières. Le projet regroupe à la fois des aspects fondamentaux, des aspects méthodologiques et des applications, la zone choisie étant le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. L'organigramme général du projet BISSECOTE (Fig. 5.1) et la description de ses 3 volets sont présentés ci-dessous. Le projet démarrera effectivement lorsque les crédits ministériels auront été versés (versement annoncé pour le premier semestre 2004).

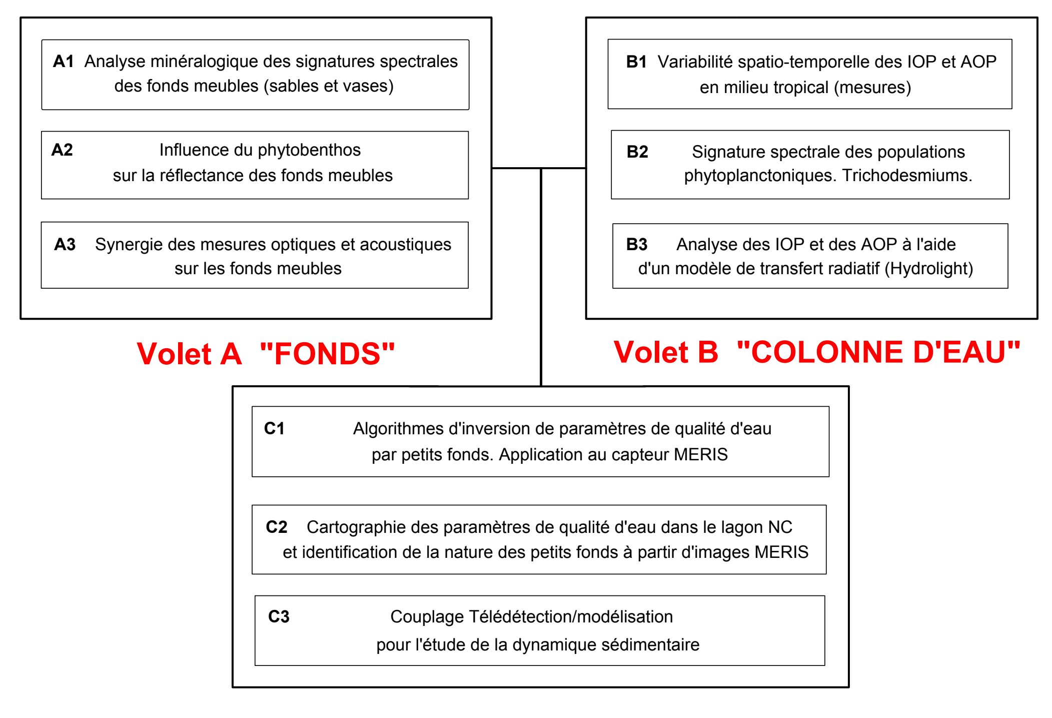


Fig. 5.1 *Schéma d'organisation du Projet BISSECOTE, ACI 'Observation de la Terre'*

Volet A « FONDS »

Les travaux fondateurs concernant l'influence des petits fonds sur la réflectance de surface [Lyzenga 1978, Philpot 1989] ont permis l'émergence récente d'applications de la télédétection en milieux coralliens [e.g. Maritorena *et al.* 1994]. L'estimation de la couverture des récifs coralliens a été réalisée à partir d'images SPOT ou Landsat TM [ref. in Lubin *et al.* 2001]. Des radiomètres imageurs hyperspectraux ont été utilisés pour cartographier phytobenthos et coraux. Ces applications se sont appuyées sur les mesures hyperspectrales des différents types de coraux, algues et herbiers [Holden et Ledrew 1999, Hochberg et Atkinson 2000]. Dans ces travaux, le sable ou la vase en présence est généralement considéré comme uniforme sur un site donné, alors que plusieurs classes d'algues et de coraux sont distinguées et que des travaux ont reporté des propriétés optiques très variées de différentes roches meubles [Siegel 1989]. En ce qui concerne les fonds peu profonds, les volets A1 et A2 du projet visent à identifier les roches meubles nues et occupées par du phytobenthos à partir de données hyper- et multispectrales dans la gamme visible.

Des données optiques et acoustiques (*RoxAnn*®) seront comparées dans le cadre du volet A3 pour explorer ce que peut apporter leur synergie à la caractérisation des fonds, à leur classification et à la détermination de certaines de leurs caractéristiques (ex : dureté) qui pourront être intégrées à terme dans un modèle de transport. Cette étude devra notamment répondre aux questions suivantes : Les mesures acoustiques et optiques sont-elles redondantes ou complémentaires ? Quelles informations spécifiques ou quels paramètres supplémentaires peut-on obtenir de la synergie entre les deux techniques ? (ex : pour deux fonds sableux de même composition identifiés par les deux techniques, peut-on estimer une hauteur de rugosité représentative des formes de fond, rides ou dunes ?) Ce travail sera effectué en collaboration avec C. Chevillon.

Volet B « COLONNE D'EAU »

Concernant la colonne d'eau, les travaux fondateurs en optique marine ont été focalisés sur les milieux hauturiers et les eaux dites du 'cas 1' [e.g. Morel et Maritorena 2001] pour lesquelles toutes les composantes co-varient avec les particules phytoplanctoniques. Les eaux côtières, à compositions et signatures optiques plus complexes dites du 'cas 2' font l'objet d'études approfondies depuis la fin des années 80 [Sathyendranath *et al.* 1989]. L'identification des principaux groupes qui composent les biomasses phytoplanctoniques n'est pas terminée et est un préalable au suivi de l'évolution de ces biomasses à l'échelle globale à partir des signaux de couleur de la mer. Dans la colonne d'eau, nous extrairons les signaux liés aux substances dissoutes, aux particules minérales et aux pigments photosynthétiques pour estimer l'abondance des producteurs primaires pélagiques, pour identifier leur principale composante et, dans le cadre de mon projet de recherche, pour estimer avec une précision toujours meilleure les teneurs en particules en suspension. Les applications potentielles de ce volet concernent à la fois l'évolution de la qualité de l'eau, l'identification d'algues potentiellement toxiques et la dynamique sédimentaire. Cécile Dupouy (UMR LODYC) est responsable de la partie "biologie" du projet.

Une série de mesures en mer est prévue avec plusieurs partenaires du projet BISSECOTE lors d'un atelier de travail qui se tiendra à Nouméa fin 2004 ou début 2005. Nous mesurerons notamment, autour de l'heure du passage des satellites ENVISAT, TERRA et AQUA, (a) les réflectances au-dessus de la surface avec un radiomètre multispectral polarisé SIMBADA à 13 canaux et avec un radiomètre hyperspectral Ocean Optics à 2048 canaux, (b) le profil vertical du coefficient de rétrodiffusion à 6 longueurs d'onde avec Hydroscat-6, (c) les spectres d'absorption des particules, détritus et matière organique colorée dissoute d'échantillons de surface, (d) le profil vertical du coefficient d'atténuation totale à 660 nm, (e) le poids sec des particules de surface, (f) le profil vertical de la distribution de tailles et de la concentration des particules (le financement d'un granulomètre *in situ* a été obtenu par le projet BISSECOTE), (g) les profils d'éclairement descendant et de luminance ascendante dans la colonne d'eau à l'aide d'un radiomètre immergeable Ramsès. Les luminances MERIS au niveau I (250 m x 250 m) et MODIS (500 m x 500 m) seront extraites aux pixels coïncidant avec les stations de mesure.

Les mesures optiques seront effectuées conjointement avec J.M. Froidefond, C. Dupouy et A. Petrenko. L'identification des groupes phytoplanctoniques dominants, de la présence de Trichodesmiums (cyanobactéries filamenteuses) et l'estimation de leur biomasse seront conduites par C. Dupouy et J. Neveux. Les mesures dont nous disposerons seront introduites dans le code de transfert radiatif HydroLight en partenariat avec A. Petrenko. Les réflectances de surface calculées par le code seront comparées aux spectres de réflectance mesurés *in situ*. Enfin, le code sera employé pour retrouver par optimisation les paramètres non mesurés et identifier ainsi les propriétés optiques inhérentes (IOP) caractéristiques du lagon et leur variabilité.

Volet C « APPLICATIONS »

Les méthodes de séparation des signaux issus respectivement de la colonne d'eau et du fond sur les images multispectrales seront testées et développées en collaboration avec S. Andréfouët, spécialiste de cartographie des habitats à partir d'images spatiales (méthode de Lee *et al.* 2001). Nous déterminerons les conditions (bathymétrie, teneur en MES, en chl*a* et en substances dissoutes) dans lesquelles il est possible d'inverser le signal de réflectance pour identifier la nature des fonds dans les bandes spectrales des capteurs satellitaux MERIS, MODIS, SPOT, Landsat et IKONOS. Nous proposerons ensuite des algorithmes d'inversion du signal adaptés aux eaux côtières tropicales supposant la nature des fonds connue et prenant en compte la concentration en MES et en chl*a* de la colonne d'eau : (a) algorithmes semi-empiriques nécessitant l'extraction au préalable du signal de fond, (b) en utilisant les sorties du code de transfert radiatif Hydrolight.

Ces algorithmes seront ensuite appliqués aux capteurs visibles utilisés en océanographie côtière et littorale. Des campagnes légères de validation bateau simultanées aux prises d'images seront réalisées : mesures optiques, profils de concentration en MES, de granulométrie, de fluorimétrie, échantillonnage des fonds. Pour le contenu en sédiments dans la colonne d'eau, nous tenterons de

corriger les images en utilisant le champ 3D de concentration en MES issu du modèle numérique de transport particulaire calé sur les mesures ponctuelles en granulométrie et concentration.

Notre participation au projet financé par la NASA (voir p.2) concernant l'utilisation conjointe de modélisation numérique et de télédétection en milieux coralliens reprend les actions de recherche du volet C du projet BISSECOTE. Ce projet est dirigé par S. Andréfouët, par ailleurs responsable de la mise à jour de l'atlas mondial des récifs coralliens réalisé également pour le compte de la NASA. Le projet a démarré en février 2004 pour une période de 3 ans. La spécificité du financement NASA nous conduira à utiliser préférentiellement des données MODIS (capteur embarqué sur les satellites américains TERRA et AQUA). Chuanmin Hu (Univ. of South Florida) me formera au traitement des données MODIS en Floride début 2005.

<u>Mesures</u>

Collaborations : P. Douillet, UR CAMELIA; C. Dupouy, LODYC, IRD Nouméa; J. Piazzola, LSEET-LEPI, USTV.

L'UR CAMELIA dispose déjà d'un parc d'instruments mis en oeuvre par P. Douillet : sonde CTD multiparamètres, profileur Döppler de courant, turbidimètres, station météo. Ce parc s'est récemment agrandi, du fait du développement récent des modèles et des besoins afférents : houlomètre Aanderaa WTR9 fin 2001, spectroradiomètre et matériel optique de base en 2002, station benthique multi-instruments en 2003 (1 courantomètre Sontek, 1 capteur de pression ultra sensible, 2 turbidimètres). Le deuxième projet ACI comprend le financement d'un granulomètre de terrain (LISST-100, Sequoia Inc.), sensible pour des concentrations supérieures à 0.1 mg/l, qui fournit dans la colonne d'eau des profils de distribution de tailles (gamme 1.25-250 µm) et de concentration. Le principe du granulomètre reposant sur la mesure de la lumière diffusée à 32 angles, cet appareil fournit également la 'Volume Scattering Function', primordiale pour la caractérisation optique des particules lorsque l'on simule le transfert radiatif dans la colonne d'eau. Ainsi les instruments de base indispensables à une équipe travaillant en hydrodynamique et dynamique particulaire en eaux côtières sont déjà largement réunis. Des équipements seront acquis pour compléter ce parc, avec recherche de financements extérieurs en complément des crédits propres IRD. A titre d'exemples : les mesures de turbidité par OBS (Optical Backscattering Sensors) seront complétées par des mesures par ABS (Acoustic Backscattering Sensors), plus sensibles aux grosses particules qu'aux fines ; des turbidimètres et courantomètres complémentaires seront achetés pour échantillonner avec précision la couche limite dynamique et le néphéloïde de fond ; il sera par ailleurs important de mettre en place plusieurs stations météo pour déterminer la variabilité spatiale du vent dans les baies entourant Nouméa.

En ce qui concerne l'optique marine, des séries de mesures communes et analyses conjointes seront poursuivies avec des chercheurs dont les intérêts convergent avec les nôtres autour de l'analyse des signatures optiques des eaux côtières, comme cela a été décrit précédemment.

Enfin, pour des mesures nécessitant l'emploi de matériel dont nous ne disposons pas, nous ferons appel à des collaborations ponctuelles dans le cadre des programmes nationaux (PNEC) ou internationaux. Ce sera par exemple le cas pour la mesure *in situ* de l'érodabilité des sédiments, pour laquelle P. Le Hir a mis au point un appareil à l'Ifremer-Brest, pour la mesure des vagues directionnelles (L. Schmied), pour la quantification et l'analyse des aérosols (J. Piazzola) et pour des appareils permettant de caractériser certaines propriétés des sédiments telle leur porosité.

5.4 Applications et Analyses

<u>Variabilité temporelle du transport particulaire</u>

Collaborations : P. Douillet, UR CAMELIA; A. Ganachaud, UMR LEGOS, IRD; L. Maîtrepierre, Météo-France, Nouméa.

L'étude de l'impact d'un cyclone sur la dynamique particulaire est prévue à long terme, avec mise en place d'instruments dédiés pour étudier le déplacement massif des sédiments engendrés par les cyclones ou tempêtes tropicales [cf Gagan *et al.* 1990]. Elle ne sera lancée que lorsque le modèle de

circulation atmosphérique aura été validé en situations caractéristiques et lorsqu'il aura été couplé au modèle hydrosédimentaire côtier 3D.

L'analyse des mécanismes principaux de la dynamique particulaire dans le lagon de Calédonie sera en revanche poursuivie à court terme à partir de séries temporelles de mesures que nous continuons à acquérir (2 jours par mois). Dans le prolongement de l'article que nous avons soumis concernant la température et la salinité et de l'article en préparation concernant la turbidité, nous poursuivrons l'étude des variabilités physiques saisonnière et interannuelle du lagon en relation avec les physiciens hauturiers et les climatologues de l'IRD (UR 065 LEGOS) et avec Météo-France.

L'analyse des variations spatio-temporelles de la dynamique particulaire à différentes échelles de temps, de la période de la vague à une échelle pluri-annuelle, en passant par l'évènementiel, est indispensable dans le cadre de ce projet puisqu'elle sera nécessaire pour déconvoluer avec plus de précision les variations saisonnières [e.g. Schrimm *et al.* 2002] et climatiques des effets anthropiques sur le transport particulaire.

Flux particulaires, Bilans sédimentaires

L'estimation des flux sur un site demande la mise en synergie de mesures de terrain généralement ponctuelles ou verticales, la description synoptique de surface permise par la télédétection et la simulation 3D s'appuyant sur les modèles, outils d'intégration appropriés.

En ce qui concerne le lagon de Nouvelle-Calédonie, la distribution générale des sédiments superficiels résulte des forçages hydrologiques et météorologiques standards qui affectent ce site la majeure partie du temps. En revanche, l'importance des remaniements sédimentaires et des flux engagés durant les périodes de cyclones ou d'évènements paroxystiques est telle qu'il est indispensable d'envisager des mesures adaptées à ces évènements qui permettront de calibrer et valider les modèles pour ces épisodes. Des estimations de flux et des bilans partiels pourront être effectués à court terme, les estimations globales seront effectuées à moyen/long terme.

La même démarche sera appliquée à la détermination des bilans et flux particulaires dans le lagon de Suva à Fidji, dans le cadre du partenariat de l'UR CAMELIA avec l'Université du Pacifique Sud qui regroupe 11 états insulaires du Pacifique. Enfin, pour étendre l'applicabilité et la portabilité de nos modèles à d'autres zones côtières tropicales et en particulier aux atolls, nous participerons, P. Douillet et moi, à la mise en œuvre d'un modèle de circulation dans un atoll de l'archipel des Tuamotu à partir de 2005, comme indiqué précédemment. Un atelier préparatoire, financé par le Ministère de l'Outre-Mer (MOM), se tiendra à Tahiti en août ou en octobre 2004.

5.5 Animation et Direction de la Recherche

Animation

Depuis que je suis accueilli à l'IRD, j'ai initié plusieurs collaborations en fonction des besoins de l'équipe que nous formons avec P. Douillet.

En **2002**, j'ai mis en place une collaboration sur les applications de la télédétection utiles à la calibration et à la validation des modèles avec S. Andréfouët, à l'époque à l'University of South Florida et CR1 IRD depuis juillet 2003, ainsi qu'une collaboration concernant la modélisation des vagues de vent avec L. Schmied, M.C. au LSEET-LEPI. J'ai également démarré des missions de mesures optiques dans le lagon de Nouvelle-Calédonie communes avec C. Dupouy, UMR LODYC.

En **2003**, mes travaux ont convergé avec ceux de C. Chevillon sur la caractérisation des propriétés des sédiments superficiels (nature ; origine terrigène ou biogène ; granulométrie ; substrats environnants : algues, herbiers, coraux) et leur érodabilité. Chevillon participera également en 2004 aux travaux commencés en 2001 concernant la couleur des sables et des vases. Une collaboration a également été initiée avec Ron Szymczak, océanographe autralien qui collabore avec l'UR 103 dans le domaine de la radiochimie, pour déterminer par exemple les temps de résidence des particules dans l'eau. Cette collaboration se poursuit dans le cadre de la thèse d'A. Jouon que je co-encadre.

En **2004** débute la modélisation de la circulation atmosphérique sur la zone incluant le lagon (et qui nécessite donc l'application du modèle à l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie) pour disposer d'un champ de vent hétérogène et réaliste pour le modèle hydrosédimentaire. Nous co-encadrons ce travail avec G. Tedeschi, M.C. au LSEET-LEPI.

Fin **2004 ou début 2005**, j'organiserai un atelier de travail en optique marine en vue de caractériser les propriétés optiques inhérentes et apparentes des eaux du lagon en plusieurs zones-clés. Cet atelier réunira J.M. Froidefond pour la mesure immergée de la réflectance hyperspectrale, C. Dupouy pour la mesure du coefficient de rétrodiffusion multispectral et de l'absorption totale et dissoute hyperspectrale, A. Petrenko pour la participation aux mesures et la modélisation du transfert radiatif, C. Payri et C. Chevillon pour la caractérisation des substrats (couvert algal, tapis cyanobactérien, sédimentologie) et S. Andréfouët pour les applications spatiales. Je travaille ou j'ai eu l'occasion de travailler avec chacun des participants à cet atelier, que j'ai réunis dans le cadre du projet BISSECOTE financé par l'ACI 'Observation de la Terre'.

En **2005** débutera l'étude des apports océaniques au lagon par-dessus le récif-barrière avec P. Bonneton, CR1 au DGO, UMR EPOC, Univ. Bordeaux 1. Philippe Bonneton, spécialiste de l'étude du déferlement des vagues et des processus associés, dirigera cette étude. Un stage de DEA sera proposé en 2005 en modélisation, en co-encadrement IRD-DGO. L. Schmied et S. Andréfouët participeront à cette étude. Parallèlement à la poursuite des travaux en modélisation atmosphérique (démarrage envisagé d'une thèse financée soit par ZoNéCo, soit par Météo-France, soit sur bourse MRT), nous commencerons également à caractériser avec J. Piazzola, MC au LSEET-LEPI, les apports particulaires au lagon par voie éolienne en mettant en place des impacteurs pour prélever des aérosols, les caractériser et les quantifier.

D'autres rencontres ont lieu en 2004 à l'occasion de projets qui me permettront de travailler avec des chercheurs australiens, américains, canadiens (projet NASA) et belges (Projet MOM sur la Polynésie). Par ailleurs, une collaboration a démarré avec P. Larcombe en 2002 alors qu'il était chercheur à la James Cook University à Townsville (Australie). En 2003, il a été appelé à de nouvelles responsabilités en Grande-Bretagne. Un article commun est en cours de rédaction sur l'analyse de la dynamique particulaire dans la baie de Dumbéa, l'une des deux baies qui entourent Nouméa, et pourrait préluder à un renforcement d'activités de recherche communes [Larcombe *et al. en prép.*]. D'autre part, j'ai donné mon accord de principe pour participer à un projet concernant la caractérisation optique des fonds coralliens (pour la partie fonds meubles : sables et vases), projet dirigé par Eric Hochberg (Université d'Hawaii) dont le financement a été demandé à la NASA début 2004.

<u>Coordination de la Recherche</u>

'Instrumentiste' depuis plus de 10 ans, mon travail a évolué durant ces trois dernières années. Tout en poursuivant les travaux dans lesquels j'étais engagé, j'ai également proposé de nouvelles 'partitions' et recherché des collègues pour les 'mettre en musique'. La **gestion (2 projets ACI) ou co-gestion (projet NASA)** m'a donné un aperçu des tâches à venir. L'historique et le contenu de ces projets me paraissent suffisamment détaillés dans ce mémoire, je ne les reprends pas ici.

Le projet de recherche que je propose nécessitera bien évidemment des fonds. La plupart des collaborations envisagées sera financée par les programmes en cours (PNEC, ACI, ZoNéCo). J'ai l'intention de demander des financements complémentaires au PATOM et au PNTS. Météo-France devrait participer financièrement à la thèse concernant la modélisation de la circulation atmosphérique en Nouvelle-Calédonie si le stage de DEA en cours apporte des résultats prometteurs.

Mon ambition est de constituer également un réseau transversal à l'IRD ouvert sur les autres EPST et EPIC regroupant les chercheurs travaillant sur la dynamique particulaire et la morphodynamique, que ce soit en domaine fluvial ou marin. Un regroupement me paraît nécessaire car les forces en présence à l'IRD sont rares, clairsemées, et pour l'instant s'ignorent ou se connaissent à peine. Un regroupement en réseau permettrait à la fois de nous rencontrer, d'échanger expériences et outils (modèles, instruments de mesure) en vue de renforcer les projets de recherche en dynamique

particulaire en milieux tropicaux, et de répondre ensemble à des expertises demandées à l'IRD ou à des appels d'offre. Un tel regroupement ne pourrait qu'augmenter la visibilité de l'IRD sur un thème de recherche intéressant particulièrement les pays en développement, sensibles à des questions comme l'envasement des barrages et retenues, les problèmes posés par le dragage, le colmatage des réseaux d'irrigation, les apports massifs de polluants (organiques, métalliques, chimiques) adsorbés et advectés par les particules, l'érosion des sols et la qualité de l'eau. Nous avons déjà évoqué une telle coopération avec quelques collègues IRD. D'autres collègues intéressés (sédimentologues, géochimistes, télédétecteurs ou hydrodynamiciens par exemple) pourraient naturellement rejoindre un tel réseau. Sur le plan formel, ce regroupement pourrait s'inscrire dans le cadre des actions transversales soutenues en interne par l'IRD. Je propose de m'y consacrer si je rejoins l'IRD, sous réserve du soutien des instances en place (CSS, Départements, Conseil Scientifique).

Bibliographie

Alibert C., Kinsley L., Fallon S.J., McCulloch M.T., Berkelmans R., McAllister F., 2003, Source of trace element variability in Great Barrier Reef corals affected by the Burdekin flood plumes. *Geoch Cosmoch Acta,* 67:231-246

Alliot E., Younes W. A. N., Romano J. -C., Rebouillon P., Massé H., 2003. Biogeochemical impact of a dilution plume (Rhone River) on coastal sediments: comparison between a surface water survey (1996–2000) and sediment composition. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57 (1-2), 357-367.

Aouad I, 2002. Modélisation du champ de vagues dans le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie, DESS Ingénierie Marine, Univ. Sud Toulon-Var.

Andréfouët S, Pages J, Tartinville B, 2001. Water renewal time for classification of atoll lagoons in the Tuamotu Archipelago (French Polynesia). *Coral Reefs*, 20, 399-408.

Antoine D., Morel A., Gentili B., Gordon H.R., Banzon V.F., Evans R.H., Brown J.W., Walsh S., Baringer W., Li A., 2003. In search of long-term trends in ocean color, *EOS*, 84 (32), 301 + 308-309.

Araujo Filho M.C., 1996. Circulations de Langmuir et turbulence sous une houle cisaillée par le vent, *Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse*, I.M.F.T.

Arnoux S., Baeckeroot A., Baghdadi N., Broche P., Devenon J.L., Forget P., Gaggelli J., de Maistre J.C., Ouillon S., Rey V., Rougier G., 1995a. Field campaign off the Rhône river mouth, Proc. *2nd Int. Conf. Mediterranean Coastal Environment*, Medcoast 95, Ozhan E. ed., 869-882.

Arnoux S., Rey V., Ouillon S., Fraunié P., 1995b. Three dimensional modelling of the Rhône deltaïc coastal zone, *Computer Modelling of Seas and Coastal Regions 2*, Brebbia C.A., Traversoni L. et Wrobel L.C. ed., Comp. Mech. Publ., 361-368.

Arnoux-Chiavassa S., 1998. Modélisation d'écoulements côtiers stratifiés présentant des fronts : application au panache du Rhône, *Thèse de l'Université de Toulon et du Var*.

Arnoux-Chiavassa S., Rey V., Fraunié P., 1999. Modelling of suspended matter fluxes off the Rhône river mouth, *J. Coastal Res*., 15(1), 61-73.

Arnoux-Chiavassa S., Broche P., Devenon J.L., Durand N., Fiandrino A., Forget P., Fraunié P., Ouillon S., Rey V., 2000. Dispersion of suspended matter in a supercritical river plume discharging in a microtidal sea : an integrated approach, *Oceanic fronts and related phenomena,* Workshop rep. 159, IOC UNESCO, 15-21.

Arnoux-Chiavassa S., Rey V., Fraunié P., 2003. Modelling 3D Rhône river plume using a higher order advection scheme, *Oceanologica Acta*, 26, 299-309.

Ashley RM, Hvitved-Jacobsen T, Bertrand-Krajewski JL 1999. Quo vadis sewer process modelling? *Water Science and Technology,* 39 (9), 9-22

Bel Madani A., 2003. Modélisation du champ de vagues de vent dans le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie, Rapport de projet de fin d'étude ENSEEIHT, IRD Nouméa.

Belaud G., 2001. A methodology for sediment transport and deposition modeling in irrigation canals, *La Houille Blanche,* (2) 83-91

Bird E.C.F., Hopley D., 1969. Geomorphological features in a humid tropical sector of the Australian coast. *Austr Geog Stud*, 7, 89-108.

Biron P.M., Richer A., Kirkbride A.D., Roy A.G., Han S., 2002. Spatial patterns of water surface topography at a river confluence. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27 (9), 913-928

Blumberg A.F., Mellor G., 1987. A description of a three-dimensional coastal circulation model, In *Three-dimensional coastal ocean models*, N. Heaps ed., American Geophysical Union, 1-16.

Blumberg A.F., Khan L.A., St John J.P., 1999. Three dimensional hydrodynamic model of New York Harbor region. *J Hydraulic* Engineering ASCE, 125 (8), 799-816

Bombardelli F.A., Hirt C.W., Garcia M.H., 2001. Computations of curved free surface water flow on spiral concentrators - Discussion. *J Hydraulic Engineering* ASCE, 127 (7), 629-631

Bouron-Morin B., 2001. Modélisation de la dynamique des sédiments fins dans le lagon de Nouvelle-Calédonie, Rapport de stage de DEA *Océanologie, Météorologie et Environnement* (Paris VI Option A) et Projet de Fin d'Etudes ENSTA, IRD-LSEET.

Bouvet G., Ferraris J., Andréfouët S., 2003. Evaluation of large-scale unsupervised classification of New Caledonia reef ecosystems using Landsat 7 ETM+ imagery, *Oceanologica Acta*, 26 (3), 281-290

Bradbrook K.F., Lane S.N., Richards K.S., 2000. Numerical simulation of three-dimensional, time-averaged flow structure at river channel confluences. *Water Resources Research,* 36 (9), 2731-2746

Bradbrook K.F., Lane S.N., Richards K.S., Biron P.M., Roy A.G., 2001. Role of bed discordance at asymmetrical river confluences. *J Hydraulic Engineering* ASCE, 127 (5), 351-368

Brenon I., Le Hir P., 1999. Modelling the turbidity maximum in the Seine estuary (France): Identification of formation processes. *Estuar Coast Shelf Sc,* 49, 525-544

Bricaud A., Bosc E., Antoine D., 2002. Algal biomass and sea surface temperature in the Mediterranean Basin, Intercomparison of data from various sensors, and implications for primary production estimates. *Remote Sensing of Environment*, 81, 163-178.

Broche P., de Maistre J.C., Forget P., 1983. Mesure par radar décamétrique cohérent des courants superficiels engendrés par le vent, *Ocean. Acta*, 6, 43-53.

Broche P., Devenon J.L., Forget P., de Maistre J.C., Naudin J.J., Cauwet G., 1998. Experimental study of the Rhône river plume I : physics and dynamics, *Ocean. Acta*, 21, 725-738.

Bunt J.A.C., Larcombe P., Jago C.F., 1999. Quantifying the response of optical backscatter devices and transmissometers to variations in suspended particulate matter, Cont. Shelf Res., 19, 1199-1220.

Cao Z., Carling P.A., 2002. Mathematical modelling of alluvial rivers: reality and myth. Part 2: Special issues. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water and maritime engineering, 154 (4), 297-307

Celik I., Rodi W., 1984. Simulation of free-surface effects on turbulent channel flows, *Physico-Chem. Hydrodyn.*, 5 (3/4), 217-227.

Celik I., Rodi W., 1988. Modeling suspended sediment transport in nonequilibrium situations, *J. Hydr. Eng*., 114 (10), 1157-1191.

Celik I., Rodi W., 1991. Suspended sediment transport for open channel flow, *J. Hydr. Eng*., 117 (2), 191-204.

Chamley H., 2000. *Bases de la sédimentologie,* Dunod (2ème édition), 192 pp.

Chao S.Y., Boicourt W.C., 1986. Onset of estuarine plumes*. J Phys Oceanography*, 16, 2137-2149.

Chao S.Y., 1987. Wind-driven motion near inner shelf fronts*. J. Geoph. Res.*, 92, 3849-3860.

Chao S.Y., 1988a. River forced estuarine plumes*. J Phys Oceanography*, 18, 72-88.

Chao S.Y., 1988b. Wind-driven motion of estuarine plumes*. J Phys Oceanography*, 18, 1144-1166.

Chapalain G., Thais L., 2000. Tide, turbulence and suspended sediment modelling in the eastern English Channel. *Coastal Eng*, 41, 295-316

Chardy P., Chevillon C., Clavier J., 1988. Major benthic communities of the south-west lagoon of New-Caledonia. *Coral Reefs*, 7, 69-75.

Cheng C.Y., Sumner P.L., Fuller C.B., Ernest A.N., 1998. Aquatic sediments. *Water Environment Research*, 70 (4), 780-807

Chevillon C., 1996. Skeletal composition of modern lagoon sediments in New Caledonia: coral a minor constituent. *Coral Reefs*, 15, 199-207.

Claustre H., Morel A., Hooker S.B., Babin M., Antoine D., Oubelkheir K., Bricaud A., Leblanc K., Quéguiner B., Maritorena S., 2002. Is desert dust making oligotrophic waters greener ? *Geophysical Research Letters,* 29(10), doi:10.1029/2001GL014056.

Clementson L.A., Parslow J.S., Turnbull A.R., Bonham P.I., 2004. Properties of light absorption in a highly coloured estuarine system in south-east Australia which is prone to blooms of the toxic dinoflagellate *Gymnodinium catenatu. Estuarine, Coastal and Shelf Science*, sous presse.

Cole J., 2003. Dishing the dirt on coral reefs. *Nature*, 421, 705-706.

Cordier E., 2000. Modélisation du transport particulaire dans le lagon de Nouméa, Rapport de stage, DEA européen *Modélisation de l'Environnement Marin*, IRD-LSEET.

Dargent C., 1996. Contribution à la modélisation de la dispersion de polluants – Etude du sillage autour d'obstacles de forme parallélépipédique, *Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse*, I.M.F.T.

Dartus D., 1998. Habilitation à diriger des recherches, INPT, ENSEEIHT.

Dartus D., Ouillon S., 1991. Code de calcul, cours polycopié ENSEEIHT, 100 pp.

de Jong V. N., de Jong D. J., 2002. ' Global Change ' impact of inter-annual variation in water discharge as a driving factor to dredging and spoil disposal in the river Rhine system and of turbidity in the Wadden Sea, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 55 (6), 969-991

Debenay J.P., 1987. Sedimentology in the South-West Lagoon of New-Caledonia, SW Pacific. *J Coastal Res*, 3, 77-91.

Devenon J.L., Broche P., de Maistre J.C., Forget P., Gagelli J., Rougier G., 1992. VHF radar measurements in the Rhone river plume, *Water Poll. Res. Reports*, 28, 75-87.

D'Ortenzio F., Marullo S., Ragni M., Ribera d'Alcalà M., Santoleri R., 2002. Validation of empirical SeaWiFS algorithms for chlorophyll-a retrieval in the Mediterranean Sea, A case study for oligotrophic seas. *Remote Sensing of Environment*, 82, 79-94.

Douillet P., Bargibant G., Hoffchir C., Laboute P., Menou J.L., Panché J.Y., Tirard P., 1989. Mesures de courant, de marée et de vent dans le lagon sud-ouest de Nouvelle Calédonie. 1ère partie: octobre 1988 à juillet 1989. *Rapp Sci Tech ORSTOM Nouméa, Sci Mer*, Biol mar 53, 271 pp.

Douillet P., Bargibant G., Hamel P., Hoffschir C., Menou J.L., Panché J.Y., Tirard P., 1990. Mesures de courant, de marée et de vent dans le lagon sud-ouest de Nouvelle-Calédonie. 2ème partie: juillet 1989 à octobre 1990. *Rapp Sci Tech ORSTOM Nouméa, Sci Mer*, Biol mar 58, 722 pp.

Douillet P., 1998. Tidal dynamics of the south-west lagoon of New Caledonia: observations and 2D numerical modelling. *Oceanologica Acta*, 21, 69-79.

Douillet P., Ouillon S., Cordier E., 2001. A numerical model for fine suspended sediment transport in the southwest lagoon of New-Caledonia, *Coral Reefs, 20*, 361-372.

Douillet P., Ouillon S., Fichez R., Panché J.Y., Enhancement of regional variations in salinity and temperature in a coral reef lagoon, New Caledonia (SW Pacific)*, Coral Reefs*, soumis.

Douillet P., Schmied L., Jouon A., Bel Madani A., Ouillon S. Comparison between numerical simulation of wind-wave distribution and wavemeter gauge measurements in a semi-enclosed lagoon, En préparation pour *J. Atmospheric and Oceanic Technology*.

Doxaran D., Froidefond J.M., Lavender S., Castaing P., 2002. Spectral signature of highly turbid waters : Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations, *Remote Sensing of Environment*, 81 (1), 149-161.

Doxaran D., Froidefond J.M., Castaing P., 2003. Remote sensing reflectance of turbid sediment-dominated waters. Reduction of sediment type variations and changing illumination conditions effects by use of reflectance ratios, *Applied Optics*, 42 (15), 2623-2634

Durand N., 2000. Modélisation numérique tridimensionnelle du panache de l'Ebre, Thèse, Université de Toulon et du Var.

Durand N., Arnoux S., Ouillon S., Rey V., Fraunié P., 1999. Three-dimensional plume of the Rhône river, *Mixing and dispersion in stably stratified flows*, P.A. Davies ed., Oxford Univ. Press, 341-353

Durand N., Fiandrino A., Fraunié P., Ouillon S., Forget P., Naudin J.J., 2002. Suspended matter dispersion in the Ebro ROFI : an integrated approach, *Continental Shelf Research*, 22, 267-284.

Estournel C., Kondratchoff V., Marsaleix P., Vehil R., 1997. The plume of the Rhone: numerical simulation and remote sensing. *Continental Shelf Research*, 17 (8), 899-924.

Estournel C., Broche P., Marsaleix P., Devenon J.L., Auclair F., Vehil R., 2001. The Rhone river plume in unsteady conditions: numerical and experimental results. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 53, 25-38.

Fang H.W., Wang G.Q., 2000. Three-dimensional mathematical model of suspended-sediment transport. *J Hydraulic Engineering*, 126 (8), 578-592.

Fichez R., Chifflet S., Douillet P., Gérard P., Bujan S., Ouillon S., Effect of terrigeneous and anthropogenic inputs on the spatial and temporal variability of water chemistry in a coral reef lagoon ecosystem, *Marine Pollution Bulletin*, soumis.

Forget P., Ouillon S., 1998. Suspended matter off the Rhône river mouth from satellite imagery, *Oceanologica Acta, 21(6), 739-749.*

Forget P., Ouillon S., Lahet F., Broche P., 1999. Inversion of reflectance spectra of non-chlorophyllous turbid coastal waters, *Remote Sens. Environ.*, 68:264-272.

Frith C.A., Mason L.B., 1986. Modelling wind driven circulation One Tree Reef, Southern Great Barrier Reef. *Coral Reefs*, 4, 201-211

Froidefond J.M., Castaing P., Mirmand M., Ruch P. 1991. Analysis of the turbid plume of the Gironde (France) based on SPOT radiometric data. *Remote Sensing of Environment*, 36, 149-163.

Froidefond J.M., Jegou A.M., Hermida J., Lazure P., Castaing P., 1998. Variability of the Gironde turbid plume by remote sensing. Effects of climatic factors. *Oceanologica Acta*, 21 (2), 191-207

Galofré J., Sánchez-Arcilla A., Jiménez J., García M., 2002. A note on FANS conclusions: From research analyses to management implications, *Continental Shelf Research*, 22 (2), 379-385.

Garvine R.W., 1974. Dynamics of small scale fronts*. J Phys Oceanography*, 4, 557-569.

Garvine R.W., 1977. Observations of the motion field of Connecticut river plume*. J Geoph. Res.*, 82, 441-452.

Gaskell P.H., Lau A.K.C., 1988. Curvature-compensated convective transport: SMART, a new boundedness-preserving transport algorithm. *Int. J. Num. Meth. Fluids*, 8, 617-641.

Gibbs R.J., Matthew M.D., Link D.A., 1971. The relation between sphere size and settling velocity, J Sediment Petrol., 41, 7-18.

Gitelson A., Karnieli A., Goldman N., Yacobi Y.Z., Mayo M., 1996. Chlorophyll estimation in the southeastern Mediterranean using CZCS images: adaptation of an algorithm and its validation. *Journal of Marine Systems*, 9, 283-290.

Gordon H.R., Brown O.B., Jacobs M.M., 1975. Computed relations between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean. *Applied Optics*, 14 (2), 417-427.

Gordon H.R., Clark D.K., 1980. Remote sensing optical properties of a stratified ocean: an improved interpretation. *Applied Optics*, 19, 3428-3430.

Gouriou Y., Delcroix T., 2002. Seasonal and ENSO variations of sea surface salinity and temperature in the South Pacific Convergence Zone during 1976-2000. *J. Geoph. Res.*, 107 (C12), 8011.

Gourlay M.R., 1996. Wave set-up on coral reefs 1. Set-up and wave-generated flow on an idealized two dimensional horizontal reef, *Coast Eng*, 27, 161-193.

Grant W.D., Madsen O.S., 1979. Combined Wave and Current Interaction With a Rough Bottom. *J Geophys Res*, 84 (C4), 1797-1808.

Grenz C., Denis L., Boucher G., Chauvaud L., Clavier J., Fichez R., Pringault O., 2003, Spatial variability in Sediment Oxygen Consumption under winter conditions in a lagoonal system in New Caledonia (South Pacific), *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Vol. 285-286, 33-47.

Hankin B.G., Holland M.J., Beven K.J., Carling P., 2002. Computational fluid dynamics modelling of flow and energy fluxes for a natural fluvial dead zone, *J. Hydraulic Res.*, 40 (4), 389-401.

Hearn C., 1999. Wave-breaking hydrodynamics within coral reef systems and the effect of changing relative sea level, *J Geoph Res*, 104 C12, 30007-30019.

Hearn C., 2001. Introduction to the special issue of Coral Reefs on ‘Coral Reef Hydrodynamics’, *Coral Reefs*, 20, 327-329.

Hearn C., Atkinson M.J., Falter J.L., 2001. A physical derivation of nutrient-uptake rates in coral reefs: effects of roughness and waves. *Coral Reefs*, 20, 347-356.

Hochberg E., Atkinson M., 2000. Spectral discrimination of coral reef benthic communities, *Coral Reefs,* 19**,** 164-171.

Hodgson G., 1999. A global assessment of human effects on coral reefs, *Mar Poll Bull*, 38 (5), 345-355.

Holden H., Ledrew E., 1999. Hyperspectral identification of coral reef features, *Int. J. Remote Sensing*, 20 (13), 2545-2563.

Holtz K.P., 1991. Numerical simulation of recirculating flow at groynes, *Computer methods in water resources 2*, Computational Mechanics Publication, Springer-Verlag, 2, 463-477

Hopley D., van Woesik R., Hoyal D.W.D., Rasmussen C.E., Steven A.D.L., 1993. Sedimentation resulting from road development, Cape Tribulation area. *Great Barrier Reef Marine Park Authority Tech. Mem.*, 24, 70 pp.

Huynh-Thanh S., Temperville A., 1995. A numerical prediction of bed shear stresses in the wave-current turbulent boundary layer over flat sea beds. *Oceanologica Acta,* 18 (1), 19-27.

Inman D.L., Jenkins S.A., 2003. Energy and sediment budgets of the global coastal zone. *Encyclopedia of Coastal Science*, M. Schwartz ed., the Earth Sciences Encyclopedia Online www.eseo.com, Kluwer Academic Publishers.

IOCCG, 2000. *Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex, waters.* Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, S. Sathyendranath ed., IOCCG, Darmouth, Canada, 140 pp. disponible à http://www.ioccg.org

Iwashita K., Kudoh K., Fujii H., Nishikawa H., 2004. Satellite analysis for water flow of Lake Inbanuma. *Advances in Space Research*, sous presse.

Jarrige F., Radok R., Krause G., Rual P., 1975. Courants dans le lagon de Nouméa (Nouvelle Calédonie). Déc.74-janv. 75. *Rapp ORSTOM (Nouméa) et H Lamb Inst Oceanogr*, Flinders Univ S Australia, 6 pp

Jia Y.F., Wang S.S.Y., 1999. Numerical model for channel flow and morphological change studies, *J Hydraulic Engineerin*, ASCE, 125 (9), 924-933

Jerlov N.G., 1964. Optical Classification of Ocean Water. In *Physical Aspects of Light in the Sea*, Honolulu:University of Hawaii Press, pp. 45–49.

Jobson H.E., Sayre W.W, 1970. Vertical transfer in open channel flow, *J. Hydr. Eng.* ASCE, 96 (HY3), 703-724

Jones J.E., 2002. Coastal and shelf-sea modelling in the European context, *Oceanography and Marine Biology*, 40, 37-141

Kirk J.T.O., 1994. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. *Cambridge Univ. Press*, 2ème ed., 510 pp.

Kraines S.B., Yanagi T., Isobe M., Komiyama H., 1998. Wind-wave driven circulation on the coral reef at Bora Bay, Miyako Island. *Coral Reefs*, 17, 133-143

Krone R.B., 1962. *Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Shoaling Processes*. Tech Rep, Hydraulic Eng Lab and Sanitary Eng Res Lab, Univ California, Berkeley CA

Lafon V., Froidefond J.M., Lahet F., Castaing P., 2002. SPOT shallow water bathymetry of a moderately turbid tidal inlet based on field measurements, *Remote Sensing of Environment*, 81 (1), 136-148.

Lahet F., 1996. Signatures optiques des matières en suspension en milieu côtier : physique de la mesure, Rapport de stage, DEA *Sciences de l'Environnement Marin*

Lahet F., 1999. Caractérisation optique d'eaux côtières méditerranéennes : mesure, modélisation et inversion des réflectances. Application aux observations satellitales. Thèse, Université de Toulon et du Var.

Lahet F., Ouillon S., Forget P., 2000. A three component model of ocean colour and its application in the Ebro river mouth area, *Remote Sensing of Environment*, 72 (2), 181-190.

Lahet F., Forget P., Ouillon S., 2001. Application of a colour classification method to quantify the constituents of coastal waters from in situ reflectances sampled at satellite sensor wavebands, *Int. J. of Remote Sensing*, 22 (5), 909-914.

Lahet F., Ouillon S., Forget P., 2001. Colour classification of coastal waters of Ebro river plume from spectral reflectances, *Int. J. of Remote Sensing*, 22 (9), 1639-1664.

Larcombe P., Ridd P.V., Prytz A., Wilson B., 1995. Factors controlling suspended sediment on inner-shelf coral reefs, Townsville, Australia. *Coral Reefs*, 14, 163-175.

Larcombe P., Costen A., Woolfe K.J., 2001. The hydrodynamic and sedimentary setting of nearshore coral reefs, central Great Barrier Reef shelf, Australia: Paluma Shoals, a case study. *Sedimentology*, 48, 811-835.

Larouche P., El-Mouttaki M., Djouai A., 2003. Spectroradiométrie de la matière particulaire dans l'oued Sebou (Maroc) : Application aux données de télédétection, *Télédétection*, 3 (1), 85-96.

Launder B.E., 1978. *Heat and mass transport, Turbulence*, P. Bradshaw ed., Springer-Verlag, Berlin.

Leblanc S., 2003. Internal wave resonances in strain flows, *J. Fluid Mech*., 477, 259-283.

Lee Z.P., Carder K.L., Chen R.F., Peacock T.G., 2001. Properties of the water column and bottom derived from Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) data., *J. Geophys. Res.*, 106 (C6), 11639-11651.

Le Normant C., 1995. *Modélisation numérique tridimensionnelle des processus de transport des sédiments cohésifs en environnement estuarien*, Thèse, INPT.

Leonard B.P., 1979. A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation. *Comput. Methods in Appl. Mech. and Eng.*, 19, 59-98.

Liu J.T., Chao S.Y., Hsu R.T., 2002. Numerical modeling study of sediment dispersal by a river plume, *Continental Shelf Research*, 22, 1745-1773.

Liu Y.S., Islam M.A., Gao J., 2003. Quantification of shallow water quality parameters by means of remote sensing, *Progress in Physical Geography*, 27 (1), 24-43.

Lubin D., Li W., Dustan P., Mazel C.H., Stamnes K., 2001. Spectral signatures of coral reefs : features from space, *Remote Sensing of Environment*, 75, 127-137.

Luce H., Fukao S., Dalaudier F., Crochet M., 2002. Strong mixing events observed near the tropopause with the MU radar and high-resolution ballon techniques, *J. Atmos. Sci.*, 59, 2885-2896.

Lyzenga D.R., 1978. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features, *Applied Optics*, 17 (3), 379-383.

Maidana M.A., Naudin J.J., Espino M., Garcia M.A., Sanchez-Arcilla A., 2002. Feasibility and usefulness of steady-state calculations of the mean circulation in the vicinity of the Ebro mouth, Model tests against field data, *Continental Shelf Research*, 22 (2), 229-245.

Marcer R., 1991. Modélisation numérique des écoulements en milieu côtier méditerranéen. Etude de l'interaction des processus physiques et biologiques, *Thèse de l'Université d'Aix-Marseille II*.

Maritorena S., Morel A., Gentili B., 1994. Diffuse reflectance of oceanic shallow waters: influence of water depth and bottom albedo, *Limnology & Oceanography*, 39 (7), 1689-1703.

Marsaleix P., Estournel C., Kondratchoff V., Véhil R., 1998. A numerical study of the Rhône river plume. *J Mar Systems*, 14, 99-115.

Martel C., 1990. Analyse géométrique et physique d'images d'observation de la terre; Eléments d'hydrodynamique côtière. *Thèse n°606 de l'Université Paul Sabatier*, CESR, Toulouse.

Massel S.R., Gourlay M.R., 2000. On the modelling of wave breaking and set-up on coral reefs. *Coastal Engineering*, 39, 1-27.

Maurel P., 1997. Analyse et modélisation des courants et la turbulence sous les vagues de vent, *Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse*, I.M.F.T.

McCulloch M., Fallon S., Wyndham T., Hendy E., Lough J., Barnes D., 2003. Coral record of increased sediment flux to the inner Great Barrier Reef since European settlement, *Nature,* 421, 727-730

McLaughlin C.J., Smith C.A., Buddemeier R.W., Bartley J.D., Maxwell B.A., 2003. Rivers, runoff, and reefs. *Global and Planetary Change*, 39, 191-199.

Mestres M., Sierra J.P., Sanchez-Arcilla A., Gonzalez del Rio J., Wolf T., Rodriguez A., Ouillon S., 2003. Numerical simulation of the Ebro River plume, *Scientia Marina*, 67 (4), 379-391.

Mikkelsen O.A., 2002a. Variation in the projected surface area of suspended particles : implications for remote sensing assessment of TSM, *Remote Sensing of Environment*, 79, 23-29.

Mikkelsen O.A., 2002b. Examples of spatial and temporal variations of some fine-grained suspended particle characteristics in two Danish coastal water bodies, *Oceanologica Acta*, 25, 39-49.

Milisic V., 1976. Contribution à l'analyse du phénomène de suspension, *Thèse de docteur-ingénieur n°509*, Université Paul Sabatier, Toulouse

Mobley C.D., 1994. *Light and Water, Radiative transfer in natural waters*. Academic Press, 592 pp.

Mobley C.D., 1999. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. *Applied Optics*, 38 (36), 7442-7455.

Molinas A., Hafez Y.I., 2000. Finite element surface model for flow around vertical wall abutments, *Journal of Fluids and Structures*, 14 (5), 711-733

Morel A., Prieur L., 1977. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*, 22, 709-722

Morel A., Maritorena S., 2001. Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal. *J. Geophys. Res.,* 106, 7163-7180.

Morrison R.J., Rao G., 1994. *Bibliography on marine pollution problems in the Pacific Islands.* The University of the South Pacific Library, Suva, 53 p.

Mueller J.L., Davis C., Arnone R., Frouin R., Carder K., Lee Z.P., Steward R.G., Hooker S., Mobley C.D., McLean S., 2000. Above-water radiance and remote sensing reflectance measurement and analysis protocols. In *Ocean Optics for satellite ocean color sensor validation, rev. 2* (G.S. Fargion and J.L. Mueller, Eds.), NASA Technical Memorandum 209966, Greenbelt MD, pp 98-107.

Munk W.H., Anderson E.R., 1948. Notes on a theory of the thermocline. *J Mar Res*, 7, 276-295.

Namin M.M., Lin B., Falconer R.A., 2001. An implicit numerical algorithm for solving non-hydrostatic free-surface flow problems. *Int J for Numerical Methods in Fluids,* 35 (3), 341-356

Naudin J.J., Cauwet G., Chrétiennot-Dinet M.J., Deniaux B., Devenon J.L., Pauc H., 1997. River discharge and wind influence upon particulate transfer at the land-sea interaction. Case study of the Rhône river plume. *Estuarine and Coastal Shelf Science*, 45, 303-316.

O'Donnell J., 1990. The formation and fate of a river plume: a numerical model. *J. Phys. Oceanography*, 20, 551-569.

O'Reilly J.E., Maritorena S., Mitchell B.G., Siegel D.A., Carder K.L., Garver S.A., Kahru M., McClain C., 1998. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *J Geoph Res*, 103, 24937-24953.

O'Reilly J.E., Maritorena S., Siegel D.A., O'Brien M., Toole D., Mitchell B.G., Kahru M., Chavez F.P., Strutton P., Cota G.F., Hooker S.B., McClain C., Carder K.L., Müeller-Karger F., Harding L., Magnuson A., Phinney D., Moore G.F., Aiken J., Arrigo K.R., Letelier R., Culver M., 2000. Ocean color chlorophyll a algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4. In : S.B. Hooker, and E.R. Firestone (Eds.), *SeaWiFS Postlaunch Technical Report Series, Vol. 11 : Seawifs Postlaunch Calibration and Validation Analyses Part 3* (pp. 9-23), NASA Technical Memorandum 206892.

Oey L.Y., Mellor G.L., 1993. Subtidal variability of estuarine outflow, plume and coastal current: a model study. *J Phys Oceanography*, 23, 164-171.

Orpin A.R., Ridd P.V., Stewart L.K., 1999. Assessment of the relative importance of major sediment-transport mechanisms in the central Great Barrier Reef lagoon. *Austr J Earth Sci*, 46, 883-896.

Ouillon S., 1993. *Modélisation mathématique de l'hydrodynamique à surface libre et du transport en suspension de sédiments non cohésifs, aide à l'interprétation d'images spatiales*, Thèse de Doctorat de l'INPT n°694, IMFT.

Ouillon S., 1998. Erosion et transport solide : ampleur et enjeux, *la Houille Blanche*, 2, 52-58.

Ouillon S., 2003. An inversion method for reflectance in stratified turbid waters, *Int. J. of Remote Sensing*, 24 (3), 535-548.

Ouillon S., Le Guennec B., 1996. Modélisation du transport de matières en suspension dans les écoulements 2D verticaux à surface libre, *J. Hydraulic Research*, 34 (2), 219-236.

Ouillon S., Dartus D., 1997. Three-dimensional computation of flow around groyne*, J. Hydraulic Engineering*, 123 (11), 962-970.

Ouillon S. Forget P., Froidefond J.M., Naudin J.J., 1997. Estimating suspended matter concentrations from SPOT data and from field measurements in the Rhône river plume, *Marine Technology Society Journal*, 31 (2), 15-20.

Ouillon S., Douillet P., Andréfouët S., 2004. Coupling satellite data with in situ measurements and numerical modeling to study fine suspended sediment transport: a study for the lagoon of New Caledonia, *Coral Reefs*, 23 (1), sous presse.

Ouillon S., Petrenko A., Chlorophyll-*a* estimation in the Gulf of Lions, Northwestern Mediterranean Sea : above-water measurements of reflectance and bio-optical algorithms, *Remote Sensing of Environment*, soumis.

Ouillon S., Douillet P., Fichez R., Jouon A. Turbidity distribution and its variability in a coral reef lagoon, New Caledonia (SW Pacific): Analysis of a 5-year series of field data En préparation pour *Marine Geology*.

Ouillon S., Douillet P., Chevillon C., Andréfouët S., Bouron-Morin B. Spatial variability of turbidity and erosion rate in a lagoonal system, New Caledonia (SW Pacific). En préparation pour *Continental Shelf Research*.

Ouillon S., Lucas Y., Chevillon C. Hyperspectral identification of sand at visible wavelengths in a remote sensing perspective over shallow waters. En preparation pour *Marine Geology*

Partheniades E., 1965. Erosion and Deposition of Cohesive Soils, *J Hydraulics Division ASCE,* 91, 105-139.

Patankar S.V., Spalding D.B., 1972. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 15, 1787.

Patankar S.V., 1980. Numerical heat transfer and fluid flow, *Series in computational methods in mechanics and thermal sciences*, Minkowycz and Sparrow Editors.

Paulmier A., 1999. Modélisation du transport de matières en suspension dans le panache du Rhône, LSEET, rapport de stage de DEA *Mécanique*.

Philpot W.D., 1989. Bathymetric mapping with passive multispectral imagery, *Applied Optics*, 28 (8), 1569-1578.

Pinazo C., Bujan S., Douillet P., Fichez R., Grenz C., Maurin A, 2004. Impact of wind and freshwater inputs on phytoplankton biomass in the coral reef lagoon of New Caledonia during the summer cyclonic period: a coupled 3D biogeochemical modelling approach. *Coral Reefs*, 23, sous presse

Raimbault P., Durrieu de Madron X., 2003. Research activities in the Gulf of Lion (NW Mediterranean) within the 1997–2001 PNEC project, *Oceanologica Acta*, 26(4), 291-298.

Reffray G., 2000. Modélisation numérique haute précision du panache du Rhône, LSEET, rapport de stage de DEA *Sciences de l'Environnement Marin*.

Rogers C.S., 1990. Responses of coral reefs and reef organisms to sedimentation, *Mar. Ecol. Prog. Ser., 62*, 185-202.

Roig L.C., 1998. Mixing and transport. *Water Environment Research*, 70 (4), 757-767

Ruddick K.G., Ovidio F., Rijkeboer M., 2000. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters, *Applied Optics*, 39, 6, 897-912.

Salat J., Garcia M.A., Cruzado A., Palanques A., Arín L., Gomis D., Guillén J., de León A., Puigdefàbregas J., Sospedra J., Velásquez Z.R., 2002. Seasonal changes of water mass structure and shelf slope exchanges at the Ebro Shelf (NW Mediterranean), *Continental Shelf Research*, 22 (2), 327-348.

Salen-Picard C., Arlhac D., Alliot E., 2003. Responses of a Mediterranean soft bottom community to short-term (1993–1996) hydrological changes in the Rhone river, *Marine Environmental Research*, 55 (5), 409-427

Sathyendranath S., Prieur L., Morel A., 1989. A three-component model of ocean colour and its application to remote sensing of phytoplankton pigments in coastal waters*, Int. J. Rem. Sens*., 10, 1373-1394.

Schaaf E., 1999. *Remise en suspension des sédiments du Golfe du Lion : expériences et modélisation*. Rapport de stage, DEA Sciences de l'Environnement Marin, Université Aix-Marseille 2, COM.

Schrimm M., Heussner S., Buscail R., 2002. Seasonal variations of downward particle fluxes in front of a reef pass (Moorea Island, French Polynesia). *Oceanologica Acta*, 25, 61-70.

Siegel H., 1989. Measurements of the spectral reflectance of different kinds of sediments and benthic organisms, *Beitr. Meeresdk*., 60, 77-78.

Simpson J.H., 1997. Physical processes in the ROFI regime. *J Marine Systems*, 12, 3-15.

Smith J.D., McLean S.R., 1977. Spatially averaged flow over a wavy surface. *J Geophysical Res*, 82, 1735-1746

Smith S.V., Buddenmeier R.W., 1992. Global change and coral reef ecosystems, *Annu. Rev. Ecol. Sys., 23*, 89.

Soulsby R.L., 1997. *Dynamics of marine sands*. Thomas Telford Publications, 249 pp.

Stumpf R.P., Pennock J.R., 1989. Calibration of a general optical equation for remote sensing of suspended sediments in a moderately turbid estuary. J Geoph Res, 94, 14363-14371.

Sukhodolov A., Uijttewaal W.S.J., Engelhardt C., 2002. On the correspondence between morphological and hydrodynamical patterns of groyne fields, *Earth Surface Processes and Landforms*, 27 (3), 289-305.

Sukhodolov A., Engelhardt C., Kruger A., Bungartz H., 2004. Case study: Turbulent flow and sediment distributions in a groyne field, *J Hydraulic Engineering* ASCE, 130 (1), 1-9.

Sydor M., 1980. Remote sensing of particulate concentrations in water. Applied Optics 19:2794-2800

Symonds G., Black K.P., Young I.R., 1995. Wave-driven flow over shallow reefs, *J. Geoph. Res*, 100 C2, 2639-2648.

Tait R.J., 1972. Wave set-up on coral reefs. *J Geoph Res*, 77(12), 2207-2211.

Tartinville B., Deleersnijder E., Rancher J., 1997. The water residence time in the Mururoa atoll lagoon: sensitivity analysis of a three-dimensional model. *Coral Reefs*, 16, 193-203

Tartinville B., Rancher J., 2000. Wave-induced flow over Mururoa atoll reef. *J Coastal Res,* 16, 776-781

Tassan S., 1994. Local algorithms using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters. *Applied Optics*, 33 (12), 2369-2378.

Thomas S., Ridd P.V., Day G., 2003. Turbidity regimes over fringing coral reefs near a mining site at Lihir Island, Papua New Guinea. *Mar Poll Bull*, 46, 1006-1014.

Thomsen L., Gust G., 2000. Sediment erosion thresholds and characteristics of resuspended aggregates on the western European continental margin. *Deep-Sea Res. I*, 47, 1881-1897.

Tolman H.L., 1991. A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents. *J. Phys. Oceanogr*., 21, 782-797

Tolman H.L., 1999. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 1.18, NOAA / NWS / NCEP / OMB Technical Note 151, 97 pp. (available at http://polar.wwb.noaa.gov/waves/wavewatch/wavewatch.html)

Turner A., Millward G.E., 2002. Suspended Particles: Their Role in Estuarine Biogeochemical Cycles, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 55 (6), 857-883.

van Rijn L., 1986. Mathematical modeling of suspended sediment in non-uniform flows, *J. Hydr. Eng.* ASCE, 112, 433-455

Vasilkov A.P., Burenkov V.I., Ruddick K.G., 1999. The spectral reflectance and transparency of river plume waters, *Int. J. Remote Sensing*, 20 (13), 2497-2508.

Verdier-Bonnet C., 1996. Modélisation des écoulements côtiers stratifiés à surface libre et paramétrisation de la turbulence; application à la dissémination larvaire. *Thèse,* Université d'Aix Marseille II.

Vermote E., Tanré D., Deuzé J.L., Herman M., Morcrette J.J., 1997. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35 (3), 675-686.

Viollier M., Sturm B., 1984. CZCS data analysis in turbid coastal water. J Geoph Res, 89, 4977-4985

Wass P.D., Marks S.D., Finch J.W., Leeks G.J.L., Ingram J.K., 1997. Monitoring and preliminary interpretation of in-river turbidity and remote sensing imagery for suspended sediment transport studies in the Humber catchment, Science Total Env., 194/195, 263-283.

Woodroffe C.D., 2000. Biogeomorphological Response to Tropical Coasts to Environmental Change, *Proc. APN/Survas/LOICZ joint conf. on Coastal impacts of climate change and adaptation in the Asia-Pacific region*, CD-Rom & on-line, N. Mimura & H. Yokoki eds., Kobé, 14-16 nov. 2000.

Xing J., Davies A.M., 2002. Influence of topographic features and along shelf flow upon the Ebro plume, *Continental Shelf Research*, 22 (2), 199-227.

Yahel R., Yahel G., Genin A., 2002. Daily cycles of suspended sands at coral reefs: a biological control. *Limnology & Oceanography*, 47 (4), 1071-1083.

Yamano H., Kayanne H., Matsuda F., Tsuji Y., 2002. Lagoonal facies, ages, and sedimentation in three atolls in the Pacific. *Marine Geology*, 185, 233-147.

Yossef M.F.M., Klaassen G.J., 2002. Reproduction of groynes-induced river bed morphology using LES in a 2-D morphological model, *River Flow 2002 - Proc. of the Int. Conf. on Fluvial Hydraulics*, Louvain-la-Neuve, Belgium

Young I.R., 1989. Wave transformation on coral reefs. *J Geoph Res*, 94, 9779-9789.

Zhan H.G., Lee Z.P., Shi P., Chen C.Q., Carder K.L., 2003. Retrieval of water optical properties for optically deep waters using genetic algorithms, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41 (5), 1123-1128 Part 2

Zhang Y., Pulliainen J., Koponen S., Hallikainen M., 2002. Application of an empirical neural network to surface water quality estimation in the Gulf of Finland using combined optical data and microwave data, *Remote Sensing of Environment*, 81 (2-3), 327-336.

Zhang Y.Z., Pulliainen J.T., Koponen S.S., Hallikainen M.T., 2003. Water quality retrievals from combined Landsat TM data and ERS-2 SAR data, in the Gulf of Finland, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41 (3), 622-629.

Zhou S.P., Zhang S.N., 1989. Application of the HH-SIMPLE algorithm for the numerical simulation of some free surface flow problems for three-dimensional situations, *Hydraulic and environmental modeling of coastal, estuarine and river waters vol. 2*, Brebbia C.A., Ouazar D. & Ben Sari D. ed., Gower Technical, 526-535.